

PARQUES URBANOS RESILIENTES: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LAS
SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA IMPLEMENTADAS PARA
MEJORAR LA ADAPTACIÓN DE LAS CIUDADES AL CAMBIO CLIMÁTICO-
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Vanessa Alexandra Villalba Pérez

Farid Camilo Ribero Cala

Trabajo de Grado para Optar al
Título de Ingenieros Civiles Modalidad investigación

Directora

Tatiana Constanza Guarín Corredor

PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirectores

José Miguel Benjumea Royero

PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

Yerly Fabián Martínez Estupiñán

PhD. en Ingeniería de Transporte y Logística

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por guiar cada uno de mis pasos, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme llegar hasta este punto tan importante de mi vida.

A mi papá, por ser el motor de mi vida, mi mayor ejemplo y el hombre más admirable que conozco. Gracias por velar siempre por mi bienestar, por tu esfuerzo constante y por brindarme las oportunidades que hoy me permiten culminar esta etapa. Todo lo que soy es en gran parte gracias a ti.

A mi mamá, por ser una mujer admirable, por su amor incondicional y por estar siempre presente, apoyándome y dándome fuerzas para seguir adelante.

A mi abuelo Luis, por ser mi inspiración para elegir esta carrera. Gracias a su vida dedicada a la construcción nació en mí este sueño. Sé que este logro lo llena de orgullo, especialmente porque siempre deseó que alguien de su familia pudiera convertirse en ingeniero civil. Este logro también es por él.

A mi hermana Karla, Gracias por enseñarme que todo lo que se hace debe hacerse con excelencia, y que la constancia y la disciplina son la base para alcanzar cualquier meta.

A mi hermanita menor Magaly, por llenar mi vida de alegría y luz. Quiero ser un ejemplo para ti y que veas en mí que con esfuerzo, disciplina y dedicación es posible alcanzar los sueños.

A mi hermano Sebas, aunque no es de sangre, lo llevo en el corazón como si lo fuera. Gracias por ser un ejemplo de trabajo duro, por tus enseñanzas y por el cariño sincero que siempre nos has brindado.

Finalmente, a mi compañero Farid, por acompañarme en este proceso, por su confianza y apoyo, hoy estamos cada vez más cerca de alcanzar esta meta tan importante en nuestras vidas.

Vanessa Alexandra Villalba Pérez

A Dios, por mostrarme siempre el camino que debía seguir cuando perdía el rumbo, por darme fortaleza y sabiduría en los momentos difíciles.

A mi padre, Fabio, por enseñarme desde muy pequeño a alcanzar metas y objetivos trabajando honestamente. Gracias por enseñarme el valor de las cosas y que, con perseverancia, se pueden conseguir grandes logros. Gracias a ti, soy el hombre que soy ahora. Te amo mucho, zurdito.

A mi madre, Madeline, la mujer más fuerte y noble que conozco. Gracias por apoyarme en todo momento, por darme siempre las mejores palabras de aliento y por ser mi apoyo incondicional. Te amo mucho, nita de mi corazón.

A mis hermanos, Andrés y Daniel, gracias por las risas. Quiero ser un ejemplo para ustedes de que, a pesar de muchas dificultades y con esfuerzo, podemos conseguir nuestros sueños.

A mi abuelo Zoilo, que no se encuentra conmigo. Gracias por las historias que pasaba en las tardes contándome, gracias por siempre confiar en mí, gracias por tratarme siempre como un ingeniero. Sé que desde el cielo estarás muy orgulloso de que tu nieto, que te extraña tanto, por fin esté muy cerca de conseguir el título de Ingeniero Civil.

A mi gran amigo Jonathan, mi segundo ángel que me protege. Gracias por enseñarme esta linda carrera en el colegio. Gracias por celebrar mis logros como si fueran los tuyos. Gracias por ayudarme a mejorar como persona. Gracias por las risas y los regaños. Este título será tanto tuyo como mío.

Finalmente, a mi compañera Vanessa, por todos estos años de carrera, por acompañarme en este proceso tan importante en nuestras vidas, por confiar en mí y por estar siempre dispuesta a superar las adversidades, hoy por fin estamos más cerca de alcanzar un gran logro.

Farid Camilo Ribero Cala

Agradecimientos

En primer lugar, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la **Universidad Industrial de Santander** por ser nuestra alma mater y brindarnos una formación basada en la excelencia académica y la calidad, valores que nos llenan de orgullo como estudiantes UIS.

A la **Escuela de Ingeniería Civil**, por acompañarnos en este proceso de formación profesional y por contar con docentes altamente capacitados, quienes aportaron significativamente a nuestro crecimiento tanto académico como personal.

A la profesora **Tatiana Guarín**, directora de este proyecto, por su guía, dedicación y apoyo incondicional durante todo el desarrollo del trabajo. Su compromiso, paciencia y disposición fueron fundamentales para alcanzar este logro. Sin duda, no pudimos haber contado con una mejor directora.

A nuestros codirectores, **José Benjumea y Yerly Martínez**, por su acompañamiento constante, por compartir sus conocimientos y por su valiosa orientación en cada etapa del proceso.

A ellos, nuestro más profundo agradecimiento por su motivación, apoyo y por contribuir de manera significativa a la culminación de este proyecto.

Tabla de contenido

1	Introducción	12
2	Objetivos	14
	2.1 Objetivo general	14
	2.2 Objetivos específicos.....	14
3	Metodología	15
	3.1 Fase 1: Revisión bibliográfica y análisis bibliométrico.	15
	3.2 Fase 2: clasificación de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) implementadas en los parques urbanos.	15
	3.3 Fase 3: identificación de indicadores técnicos y ambientales.	16
	3.4 Fase 4: Construcción del marco de referencia.	16
4	Resultados	17
	4.1 Proceso de revisión bibliográfica	18
	4.2 Análisis bibliométrico	19
	4.3 Clasificación e identificación de criterios técnicos y ambientales de las SbN.....	22
	4.3.1 Criterios ambientales	24
	4.3.2 Criterios técnicos	32
	4.4 Marco de referencia.....	36
	4.5 Tendencias y lagunas	41
	4.5.1 Tendencias	41
	4.5.2 Lagunas	41

5	Conclusiones	43
6	Referencias Bibliográficas	46

Lista de tablas

Tabla 1. Publicación en journals.....	21
Tabla 2. Marco de referencia construido	37
Tabla 3. Distribución de los artículos por países	42

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de investigación.	18
Figura 2. Crecimiento anual de la investigación.	20
Figura 3. Mapa de coocurrencia de las palabras clave	22
Figura 4. Clasificación de criterios ambientales y técnicos para evaluar SbN en parques urbanos resilientes	23

Resumen

Título:

Resilient Urban Parks: A Bibliographic Analysis of Nature-Based Solutions Implemented to Enhance Cities' Adaptation to Climate Change – Research Study

Autor: Vanessa Alexandra Villalba Pérez y Farid Camilo Ribero

Palabras clave: Resiliencia urbana, Soluciones basadas en la naturaleza, cambio climático, adaptación.

Descripción:

Este estudio realiza una revisión bibliográfica enfocada en el rol de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) dentro de los parques urbanos como estrategia clave para promover la resiliencia climática. A través de un análisis bibliométrico y la clasificación de 42 artículos, se lograron identificar tendencias principales, metodologías recurrentes e indicadores relevantes. Los resultados destacan que la efectividad de las SbN radica en la interacción entre criterios ambientales, como la regulación térmica, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, y criterios técnicos, entre ellos modelos avanzados de planificación, herramientas de inteligencia artificial y sistemas de evaluación. Sin embargo, también se detectaron vacíos significativos, como la escasez de investigaciones centradas en América Latina y la falta de estándares metodológicos uniformes. Este trabajo ofrece un marco de referencia útil para la evaluación y planificación de infraestructura verde urbana, contribuyendo al fortalecimiento de las estrategias de adaptación climática en entornos urbanos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Tatiana Constanza Guarín Corredor . Codirectores. Jose Miguel Benjumea y Yerly Fabián Martínez

Abstract

Title: Resilient Urban Parks: bibliographic analysis of the classification criteria according to their contribution to the response capacity of cities to extreme events.

Authors: Farid Camilo Ribero Cala y Vanessa Alexandra Villalba Pérez

Keywords: Urban resilience, Nature-based Solutions (NbS), Climate change, Adaptation.

Description:

This study conducts a literature review of the role of Nature-based Solutions (NbS) in urban parks as a key strategy for promoting climate resilience. Through a bibliometric analysis and the classification of 42 articles, major trends, recurring methodologies, and relevant indicators were identified.

The results highlight that the effectiveness of NbS lies in the interaction between environmental criteria such as thermal regulation, biodiversity, and ecosystem services and technical criteria, including advanced planning models, artificial intelligence tools, and evaluation systems. However, significant gaps were also identified, such as the limited number of studies focused on Latin America and the lack of standardized methodological frameworks.

This work provides a useful reference framework for the evaluation and planning of urban green infrastructure, contributing to the strengthening of climate adaptation strategies in urban environments.

* Bachelor's Thesis

**Faculty of Physical Chemistry. School of Civil Engineering. Director: Tatiana Constanza Guarín Corredor Codirectores. Jose Miguel Benjumea y Yerly Fabián Martínez

Reconocimiento de uso de inteligencia artificial

En la realización de este trabajo de investigación, se utilizaron herramientas de inteligencia artificial como apoyo metodológico y de redacción. Una de las herramientas empleada fue DeepSeek (DeepSeek, 2024), que facilitó la revisión bibliográfica, especialmente en la filtración y selección de artículos relacionados con nuestros objetivos y que resultaron pertinentes para nuestra investigación. Adicionalmente, se usó Grammarly (Grammarly, 2024) como apoyo para mejorar la redacción, aportando claridad y coherencia al texto y corrigiendo errores gramaticales sin alterar el contenido ni el aporte intelectual original de los autores. También recurrimos a Microsoft Copilot (Microsoft, 2024) para generar imágenes a partir del contenido de nuestro documento, exclusivamente con fines ilustrativos. Estas herramientas fueron utilizadas de manera responsable y ética, asegurando en todo momento que se respetaran la autoría, el análisis y el conocimiento adquirido por cada investigador.

1 Introducción

El cambio climático está creciendo de manera exponencial; su ritmo acelerado afecta en gran medida a las ciudades no preparadas, por lo que se plantea el desafío de reconsiderar el enfoque de los espacios públicos (Negrello, 2023). Las zonas urbanas, como centros de actividad económica, social y medioambiental, son vulnerables a los efectos del cambio climático, donde emergen diversas problemáticas como islas de calor, aumento descontrolado de la escorrentía o inundaciones (Jaiswal et al., 2024). En consecuencia, surge la necesidad de plantear estrategias de adaptación en las ciudades para que sean resilientes, incorporando el desarrollo sostenible como pilar fundamental de la planeación territorial (Yang et al., 2023). Una de las estrategias consiste en la aplicación de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), consolidadas por ser una respuesta robusta frente a la crisis climática. Las SbN integran zonas verdes y azules en la infraestructura urbana; estas intervenciones no solo optimizan la resiliencia de las ciudades, sino que también transforman el entorno habitable mediante la creación de espacios naturales, como parques (Kabisch et al., 2016). El potencial de las SbN para transformar la planificación urbana fue un tema central de la Cities and Climate Change Science Conference (IPCC) celebrada en Edmonton en 2018. Allí se reconoció su valor estratégico, aunque también se identificaron carencias críticas en la evidencia científica necesaria para su aplicación a gran escala (Frantzeskaki et al., 2019).

Por otro lado, Colombia está experimentando un cambio de paradigma; es un país pionero en la integración de infraestructura verde y azul en la planificación urbana, un proceso en el que las ciudades han comenzado a priorizar la conectividad ecológica y los espacios verdes (Pradilla & Hack, 2024). A pesar de este avance, su aplicación efectiva en el territorio enfrenta barreras debido a la falta de articulación entre los actores técnicos y ambientales (Burgos-Ayala et al., 2022). Por

tanto, surge la necesidad de crear estrategias que fomenten la sostenibilidad urbana mediante una comunicación interdisciplinaria que reconecte ambas visiones. Así, con este trabajo de grado se busca responder mediante una revisión bibliográfica la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las tendencias y lagunas en los parámetros técnicos y ambientales que determinan la efectividad de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en parques urbanos como estrategias para fortalecer la resiliencia climática en las ciudades?

El estudio se justifica por la necesidad de aportar una base de información sólida sobre los criterios técnicos y ambientales de las SbN propuestas en la literatura científica. La respuesta a la pregunta de investigación facilitará la evaluación y la gestión de los parques urbanos, concebidos como infraestructura esencial para la resiliencia de las ciudades colombianas. Por lo tanto, se busca proveer herramientas conceptuales eficaces que apoyen la planificación de ciudades adaptativas y sostenibles ante los desafíos que plantean el crecimiento urbano y el cambio climático.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Establecer, a partir de la revisión de la literatura, un marco de referencia sobre las características y el impacto de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en la adaptación de las ciudades frente al cambio climático.

2.2 Objetivos específicos

Identificar parámetros bibliométricos mediante la exploración de tendencias y lagunas de investigación sobre el impacto de la resiliencia urbana, a través de las SbN implementadas en parques urbanos para mitigar el cambio climático

Categorizar las SbN implementadas en parques urbanos como estrategias de mitigación de los efectos del cambio climático, considerando aspectos técnicos y ambientales de estas.

Identificar los indicadores técnicos y ambientales que dan cuenta de la efectividad de los SbN en los parques urbanos como estrategia para la resiliencia climática.

3 Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se siguió una metodología compuesta por cuatro fases que facilitaron su desarrollo y ejecución. A continuación, se describirá cada una de las fases y sus respectivas actividades.

3.1 Fase 1: Revisión bibliográfica y análisis bibliométrico.

Se desarrolló y aplicó una estrategia sistemática de búsqueda en la base de datos Scopus, empleando operadores booleanos (AND, OR) para combinar términos clave relacionados con la resiliencia urbana, los parques urbanos, las SbN y el cambio climático. Se definieron criterios de inclusión y exclusión que abarcaron el periodo 2015–2025, el tipo de documento (artículos de investigación y de revisión) y el idioma (inglés y español). Los resultados fueron exportados en formato .CSV y pasaron por un proceso inicial de filtrado, en el que se eliminaron los estudios con enfoques sociales o políticos. Para el filtrado y la categorización se empleó la herramienta DeepSeek, a la que se le proporcionaron los objetivos de la investigación como criterios de selección. El proceso y los resultados del filtrado se detallan en el Apéndice 2. Posteriormente, se realizó una revisión manual de los títulos y resúmenes para definir los documentos finales. Los artículos elegidos se organizaron en Zotero para su gestión y análisis posteriores. Finalmente, el software *VOSviewer* se empleó para realizar un análisis bibliométrico orientado a identificar autores, palabras clave, redes de colaboración y tendencias emergentes en el área de investigación.

3.2 Fase 2: clasificación de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) implementadas en los parques urbanos.

Con base en los artículos seleccionados, se organizó la información en tablas. Estos datos fueron clasificados según criterios técnicos y ambientales, agrupados en temas principales y subgrupos específicos. Este proceso permitió identificar similitudes en los enfoques y en las

problemáticas abordadas, lo que favoreció la estructuración y la síntesis eficientes de la información.

3.3 Fase 3: identificación de indicadores técnicos y ambientales.

Se partió de la clasificación de los artículos según criterios técnicos y ambientales, organizándolos en temas principales y subgrupos específicos. Esta estructura permitió elaborar tablas que consolidaron la información recopilada (ver Anexo 3), lo que facilitó un análisis más claro y exhaustivo. Se identificó un conjunto de artículos relacionados con los criterios ambientales y técnicos. Los artículos del ámbito ambiental incluyeron temas como los servicios ecosistémicos, la biodiversidad, el cambio climático, los recursos hídricos y la calidad del aire. Por su parte, los artículos técnicos se clasificaron según las metodologías aplicadas, los modelos analíticos, los indicadores, las herramientas operativas y las estrategias de planificación y optimización. Para esta clasificación y la categorización posterior, se identificaron relaciones y enfoques comunes entre los estudios analizados, lo que permitió integrar la información en los subgrupos definidos.

3.4 Fase 4: Construcción del marco de referencia.

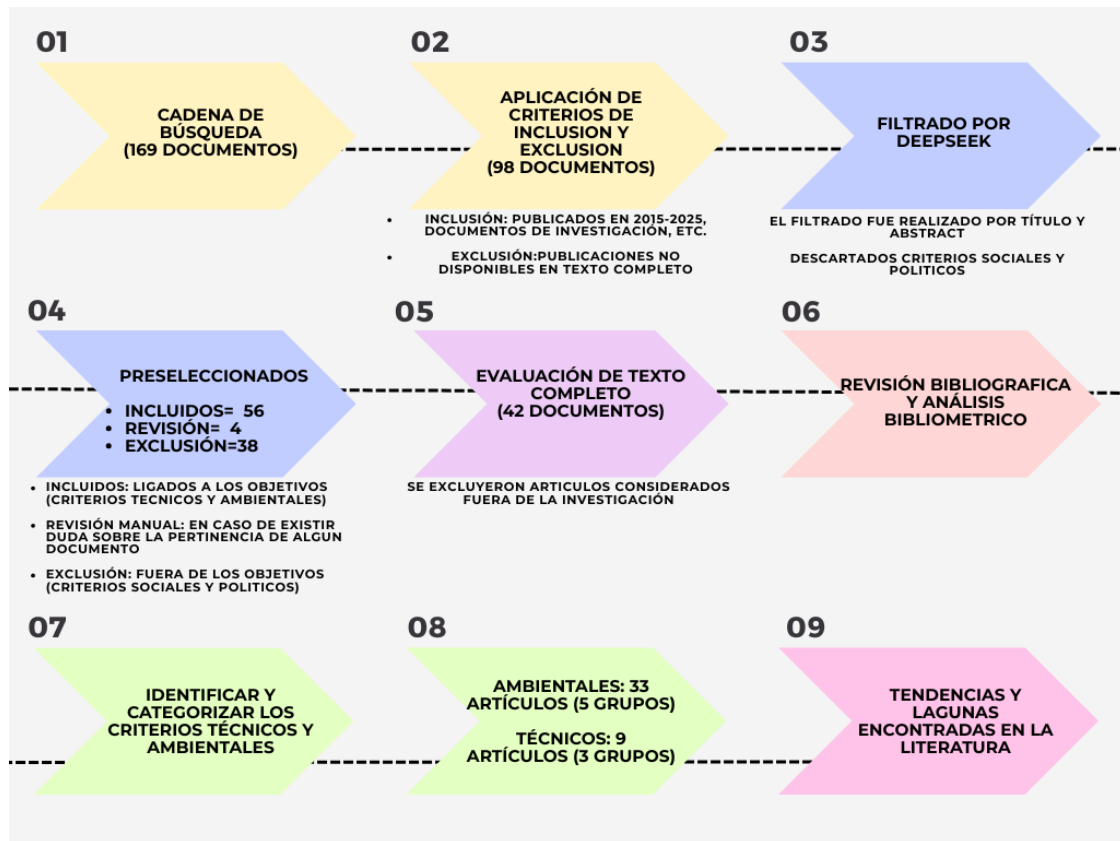
A partir de los resultados obtenidos, se sintetizaron los hallazgos clave, se identificaron tendencias relevantes y se resumieron las lagunas en la literatura, todo ello en una tabla. El análisis de los indicadores técnicos y ambientales, como resultado, permitió construir un marco de referencia integral orientado a fortalecer la implementación de SbN como estrategia para favorecer la adaptación urbana al cambio climático.

4 Resultados

La *Figura 1* presenta el diagrama de flujo del proceso sistemático de búsqueda y selección de artículos empleados en la investigación. El proceso comenzó con la definición de la cadena de búsqueda en Scopus, lo que dio como resultado 169 documentos. Posteriormente, mediante un proceso de filtrado inicial, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión (período 2015-2025 y tipo de documento), lo que redujo la muestra a 98 documentos, para mayor detalle, ver Anexo 1. Seguidamente, mediante la herramienta DeepSeek, se realizó un filtrado por título y resumen (ver Anexo 2), complementado con una revisión manual por que se reconoce que el uso de herramientas artificiales puede implicar riesgos como la generación de información inexacta, para mitigar este riesgo todos los resultados fueron contrastados con las fuentes originales manualmente, lo que permitió seleccionar 56 documentos. Finalmente, tras una evaluación del texto completo, se seleccionaron 42 artículos directamente relacionados con los indicadores técnicos y ambientales, que constituyen la base del presente trabajo de investigación.

Figura 1.

Diagrama de flujo del proceso de investigación.



Nota: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial (Microsoft copilot).

A continuación, se presentan en detalle los resultados, organizados en cinco apartados: (1) proceso de revisión bibliográfica, (2) análisis bibliométrico, (3) clasificación de los criterios técnicos encontrados en la literatura, (4) marco de referencia y (5) tendencias y lagunas detectadas en la literatura científica.

4.1 Proceso de revisión bibliográfica

La búsqueda definitiva en la base de datos se diseñó tomando como punto de partida las preguntas iniciales y los términos clave asociados a parques urbanos, resiliencia climática, SbN, evaluación de desempeño, indicadores y mitigación del efecto de las islas de calor. Esto aseguró una cobertura temática tanto amplia como detallada. La cadena de búsqueda definitiva puede

encontrarse en el Anexo 1. Se resalta que, en esta etapa de depuración, se descartaron aquellos estudios que, si bien abordaban temáticas relacionadas, presentaban un enfoque principalmente orientado a aspectos sociales, salud pública, comunidades y huertos urbanos, lo cual no se ajustaba plenamente al enfoque deseado.

4.2 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico de la producción científica (Figura 2) revela tres etapas distintivas que marcan el desarrollo de las SbN aplicadas a la resiliencia urbana. En primer lugar, se identifica una fase de latencia (2016-2021), caracterizada por un interés mínimo y una producción limitada, con un promedio de menos de cinco artículos anuales. Este periodo refleja una etapa de exploración conceptual en la que las SbN aún no se consideraban una estrategia robusta de adaptación climática para parques urbanos. Posteriormente, surge una etapa de despegue (2022-2024), en la que el volumen de publicaciones comienza a incrementarse de manera constante, alcanzando 19 artículos en 2024. Este comportamiento indica que el concepto de parques urbanos resilientes mostró una mayor integración teórica, lo que abrió paso a nuevas líneas de investigación técnica. Finalmente, los 45 artículos publicados en 2025 marcan una fase de crecimiento exponencial; esta aceleración evidencia que el tema ha pasado a ocupar un lugar prioritario en la agenda científica global, consolidándose como una potencial solución de interés para mitigar los efectos del cambio climático en los entornos urbanos.

Figura 2.

Crecimiento anual de la investigación.



Los resultados del análisis de la distribución de publicaciones por *journal* (Tabla 1) muestran una concentración inicial en tres revistas de alto impacto, lideradas por *Land* (4 publicaciones), seguidas por *Science of the Total Environment* y *Sustainability*, con 3 artículos cada una. Este núcleo fue considerado de alta frecuencia, concentrando el 23.8 % de los 42 artículos de la investigación, posicionándose como los canales principales para la difusión de conocimiento sobre la resiliencia urbana a través de las SbN. La frecuencia media está compuesta por tres revistas, con dos publicaciones cada una (14.3% del total): *Forest, One Ecosystem* y *Urban Forestry & Urban Greening*. Finalmente, la distribución muestra una dispersión bibliográfica, donde 26 de las 32 revistas identificadas (81.2%) aparecen con baja frecuencia. Este perfil de publicación demuestra una amplia base de fuentes, lo que evidencia una naturaleza multidisciplinar de la literatura científica consultada y permitirá integrar aportes de diferentes sectores, como la planificación, la ecología urbana y distintas herramientas de mitigación del cambio climático.

Tabla 1.*Publicación en journals.*

Categoría (Número de publicaciones)	Número de revistas	Ejemplos destacados
Alta frecuencia (≥ 3)	3	Land (4), Science of the total Environment (3) y Sustainability (3)
Media frecuencia (2)	3	Forest, One Ecosystem y Urban Forestry and Urban Greening
Baja frecuencia (1)	26	Smart Cities, Bioystems Diversity, Ecological Indicators, etc.

La Figura 3 presenta el análisis de coocurrencia de palabras clave donde 42 términos identificados con una frecuencia mínima de tres apariciones. Destacan *ecosystem service* (14 veces), *urban planning* (12 veces), *greenspace* (10 veces) y *climate change* (9 veces). Se identifican cuatro clústeres, destacados en colores. El clúster en rojo, sobre planificación urbana e infraestructura verde (*Ecosystem service, green infrastructure, biodiversity, and sustainable development*). Por otro lado, el clúster verde, centrado en parques urbanos y su impacto (*Ecosystem, green spaces, recreational park, vegetation, heat*). El tercer grupo, en azul, está enfocado en mitigación climática (*Climate change, cooling, and climate vulnerability*). Finalmente, el clúster amarillo, que actúa como puente conector entre demás términos (*greenspace, urban planning y urban area*). Estos hallazgos evidencian que la literatura científica trata estos de forma interrelacionada, resaltando la infraestructura verde y los servicios ecosistémicos como estrategias clave frente al cambio climático, entre ellos las islas de calor y la vulnerabilidad humana.

operativas, y estrategias de planificación y optimización. Como resultado de esta sistematización, se identificaron relaciones y enfoques comunes entre los estudios analizados, lo que facilitó la integración de la información según los subgrupos definidos. A continuación, se detallan los resultados organizados por cada categoría y tema tratados.

Figura 4.

Clasificación de indicadores ambientales y técnicos para evaluar SbN en parques urbanos resilientes.



Nota: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial (Gemini)

4.3.1 Indicadores ambientales

4.3.1.1 Grupo 1: Regulación térmica y mitigación de islas de calor

Desde el punto de vista metodológico, el cambio climático ha sido abordado desde diferentes enfoques, cuantitativos, geoespaciales y sociales. Por ejemplo, los datos geoespaciales se han obtenido a partir de imágenes satelitales de Landsat, herramienta que permite estimar la temperatura superficial del suelo (LST) y su evolución en el tiempo. En este sentido, algunos estudios (Ranagalage et al., 2020; Karami & Mousavi, 2025) identificaron cambios en el uso del suelo y en la distribución de la UHI en la ciudad, aplicando herramientas (Google Earth Engine), algoritmos de clasificación (*Random Forest* y *TreeNet*) y análisis espaciales (Getis-Ord Gi).

De manera complementaria, otros estudios han incorporado modelos de simulación y de aprendizaje automático más avanzados para analizar las UHI. El uso de algoritmos de *machine learning*, acoplados con datos satelitales y mediciones *in-situ*, ha resaltado las diferencias entre la temperatura superficial terrestre (LST) y la temperatura percibida por la población. Por otro lado, el rol de la cobertura arbórea, en particular la densidad del dosel, se ha identificado como determinante de la reducción térmica urbana. Adicionalmente, la integración de simulaciones microclimáticas y análisis satelitales multitemporales confirma que el desempeño de la infraestructura verde depende de factores como el tamaño de los parques, la composición de las especies y su configuración espacial. Adicionalmente, la literatura destaca la necesidad de enfoques integradores en la planificación urbana, dado que los beneficios de los servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación climática, la captura de carbono, la purificación del aire y los servicios recreativos, no dependen exclusivamente de la extensión de áreas verdes, sino también de factores como la conectividad ecológica y la biodiversidad (Zaerpour et al., 2025; Bai & Xing, 2025); Tieskens et al., 2022).

Por otro lado, estudios que incluyen modelos de enfriamiento urbano, como InVEST, han mostrado que la implementación de techos verdes reduce la temperatura debido a variables como la densidad del dosel arbóreo, el albedo y la evapotranspiración (Chung & Sung, 2025). Asimismo, la combinación de estrategias genera mayores beneficios en términos no solo de reducción de temperatura, sino también aumento en eficiencia energética y captura de carbono.

Además, de los enfoques físicos y espaciales, desde una perspectiva social, la presencia de UHI impacta el comportamiento de la población urbana, donde las incomodidades térmicas en las viviendas actúan como factor que promueve la búsqueda de espacios verdes como refugios climáticos (Wong et al., 2024).

La combinación de todas estas metodologías geoespaciales, de simulación, de machine learning y de análisis social evidencia que la mitigación de las UHI es un fenómeno multidimensional. Esta confirmación sugiere que la expansión urbana, asociada a superficies impermeables, incrementa la temperatura de las ciudades, mientras que la vegetación, la infraestructura verde y azul constituyen elementos estratégicos para su mitigación (Chung & Sung, 2025; Ranagalage et al., 2020; Tieskens et al., 2022).

En este sentido, las SbN dirigidas a incrementar las zonas verdes, la restauración ecológica, la incorporación de techos verdes y la planificación estratégica de la infraestructura verde en los parques urbanos son fundamentales para reducir el calor urbano, mejorar la calidad ambiental y aumentar la resiliencia de las ciudades ante el cambio climático (Chung & Sung, 2025; Ranagalage et al., 2020; Schmidt & Walz, 2021).

4.3.1.2 Grupo 2: Evaluación y cuantificación de servicios ecosistémicos

El conjunto de artículos analizados en este grupo aborda de manera integral la evaluación y cuantificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por los espacios verdes urbanos,

entendidos como los beneficios que los ecosistemas aportan al bienestar humano, incluyendo la regulación climática, la captura de carbono, la mejora de calidad del aire, la reducción de la escorrentía y la conservación de la biodiversidad (Busca et al., 2025; Cortinovis & Geneletti, 2018; E. Lee & Kim, 2023; Peng et al., 2022).

En este contexto, diversos autores coinciden en que no basta con analizar únicamente la cantidad de áreas verdes, sino que es fundamental evaluar su funcionalidad ecológica, es decir, su capacidad real para generar simultáneamente múltiples servicios ecosistémicos (E. Lee & Kim, 2023; Xu & Ding, 2025). En esa línea, el estudio de (Boehnke et al., 2022) evidencia de que la provisión de servicios ecosistémicos depende de variables como la densidad de la vegetación, la diversidad de especies y la conectividad ecológica, lo que implica que no todos los espacios verdes aportan los mismos beneficios (E. Lee & Kim, 2023). Además, Peng et al. (2022) señalan que estos beneficios no se comportan de una manera lineal ni homogénea, lo que contribuye a desigualdades ambientales significativas.

Para abordar esta complicación, herramientas o metodologías como iTree-Eco permiten estimar los servicios ecosistémicos urbanos, como la eliminación de contaminantes del aire, el almacenamiento y el secuestro de carbono, la producción de oxígeno y la reducción de la escorrentía, mediante indicadores medibles, y evidencian además beneficios económicos de la infraestructura verde (E. Lee & Kim, 2023; Xu & Ding, 2025). En la planificación urbana, los servicios ecosistémicos pueden utilizarse como herramientas para priorizar las intervenciones territoriales incluyendo dimensiones ambientales y sociales (Cortinovis & Geneletti, 2018). Por otra parte, estudios recientes resaltan la relación entre los servicios ecosistémicos y el bienestar urbano, mostrando la relación no todas las veces es lineal y demanda una mayor articulación entre la planificación ambiental y el bienestar social (Gan et al., 2024).

Asimismo, en regiones con dificultades para acceder a datos, algunos estudios han propuesto metodologías orientadas al uso de información abierta, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) combinado con tecnologías avanzadas, como LiDAR para mejorar la estimación de servicios ecosistémicos y, en consecuencia, fortalecer la toma de decisiones en planeación urbana (De Montis et al., 2025; Xu & Ding, 2025).

En conjunto, los artículos analizados demuestran que la evaluación y cuantificación de los servicios ecosistémicos constituyen una herramienta fundamental para comprender el valor integral de los espacios verdes urbanos, evidenciando sus beneficios ambientales, sociales y económicos (Gan et al., 2024; E. Lee & Kim, 2023; Peng et al., 2022). Asimismo, se resalta la importancia de integrar estos análisis en la planificación urbana para reducir las desigualdades, optimizar el uso del suelo y adaptar las ciudades al cambio climático (Cortinovic & Geneletti, 2018; De Montis et al., 2025).

4.3.1.3 Grupo 3: Biodiversidad, conectividad y composición ecológica

Los artículos agrupados en esta categoría analizan la biodiversidad urbana desde diferentes enfoques, pero coinciden en que no basta con la presencia de espacios verdes, sino con su distribución, funcionamiento ecológico y conexión dentro de la ciudad.

En esa dirección, el estudio de Tieskens et al. (2022) evalúan los espacios verdes urbanos en la ciudad de Boston (USA) centrándose específicamente en su capacidad de enfriamiento a través de la evapotranspiración. A partir de datos satelitales y modelos climáticos, los autores analizan cómo estos espacios contribuyen a mitigar el calor urbano durante las olas de calor. Además, incorporan un componente social mediante el índice de riesgo de calor, que considera factores como la edad y la pobreza. Los resultados muestran que existen zonas donde la demanda de enfriamiento es alta, pero la oferta ecológica es escasa, especialmente en las comunidades de

bajos recursos. Este enfoque es clave, ya que establece los espacios verdes como una función ecológica, no solo por su cobertura, lo cual ayuda a comprender el funcionamiento interno de los ecosistemas urbanos.

Paralelamente, Kunakh et al. (2022) profundizan en el funcionamiento ecológico, pero a la escala de un parque urbano. Este estudio analiza cómo la estructura del dosel arbóreo, las propiedades del suelo y las condiciones microclimáticas se relacionan entre sí. Mediante sensores remotos e índices como el NDVI, los autores demuestran que es posible estimar las condiciones ecológicas a partir de imágenes satelitales. Adicionalmente, el estudio reporta que variables como la densidad de la vegetación están fuertemente relacionadas con la temperatura y la humedad del suelo, lo que confirma que los espacios verdes no solo están presentes, sino que también presentan un comportamiento ecológico completo.

Por otro lado, el estudio de Jeong & Park (2024) amplían el análisis a la estructura espacial de los bosques urbanos, evaluando tres aspectos: disponibilidad, accesibilidad y conectividad. Los autores evidencian que existen grandes desigualdades entre las distintas zonas de la ciudad, donde algunos distritos presentan alta cobertura vegetal, pero baja accesibilidad para la población. Además, demuestran que la conectividad ecológica depende tanto de la distancia entre los bosques urbanos como de su tamaño, lo cual afecta el movimiento de especies y el funcionamiento de los ecosistemas urbanos.

En esta misma línea, Grilo et al. (2025) emplean la composición ecológica para analizar los árboles urbanos en función de sus rasgos funcionales, como la capacidad de adaptación y provisión de servicios ecosistémicos. A partir de más de 21.000 árboles, los autores los clasifican en tres tipos funcionales (templado, mediterráneo y tropical) según su tolerancia a las condiciones climáticas y a las plagas. Los resultados demuestran que las especies más resilientes al cambio

climático no están suficientemente representadas, por lo tanto, este estudio se conecta con los anteriores, ya que no solo importa la cantidad o distribución de la vegetación, sino también qué tipo de especies la componen, ya que esto influye directamente en la funcionalidad ecológica y en la resiliencia urbana.

En conjunto, estos estudios permiten comprender la biodiversidad urbana como un sistema complejo en el que interactúan múltiples factores. Es importante resaltar que no solo importa la cantidad de espacios verdes, sino también su capacidad de generar servicios ecosistémicos, sus condiciones ecológicas internas, su conectividad dentro de la ciudad y la diversidad funcional de las especies que los componen. Esta integración de enfoques evidencia la necesidad de una planificación urbana que combine criterios ecológicos, espaciales y sociales para lograr ciudades más sostenibles.

4.3.1.4 Grupo 4: Funcionalidad de los espacios verdes urbanos.

En este grupo de estudios se examina la relación entre los espacios verdes urbanos y la provisión de servicios ecosistémicos, con un enfoque particular en el efecto de enfriamiento. Estas investigaciones integran tanto variables biofísicas como, en menor medida, factores sociales asociados a la distribución espacial del verde urbano en las ciudades. Por ejemplo, Tieskens et al. (2022) analizan el enfriamiento urbano mediante la evapotranspiración como indicador funcional. El estudio evidencia que esta variable permite evaluar con mayor precisión la capacidad real de los espacios verdes para regular la temperatura, al tiempo que facilita la identificación de desajustes espaciales en zonas con mayor necesidad. Complementariamente, Lee et al. (2025) exploran la relación entre la cobertura arbórea y la temperatura superficial, identificando un comportamiento no lineal en el que el efecto de enfriamiento aumenta hasta alcanzar un umbral cercano al 40% de cobertura arbórea. Esto señala la importancia de factores como la cantidad y

densidad del dosel arbóreo en la regulación térmica. Por otro lado, Jeong & Park (2024) incorporan variables espaciales, como la accesibilidad y la conectividad de los bosques urbanos. Su investigación demuestra que la configuración del sistema verde influye significativamente en su funcionalidad en el entorno urbano. En una línea similar, Kunakh et al. (2022) destacan que factores como la estructura del dosel, la humedad del suelo y los índices espectrales (NDVI, NDII) explican gran parte de la variabilidad microclimática, lo que afecta directamente la provisión de servicios ecosistémicos. En conjunto, estos estudios revelan que, aunque los componentes sociales desempeñan un papel en la distribución de los espacios verdes urbanos, la provisión efectiva de servicios ecosistémicos depende fundamentalmente de factores como la extensión de la cobertura vegetal, las características ecológicas, la configuración espacial y las funcionalidades específicas de la vegetación. Estos elementos constituyen pilares esenciales para la planificación y gestión estratégicas de los espacios verdes urbanos.

4.3.1.5 Grupo 5: Servicios específicos de regulación

Los artículos agrupados en esta categoría analizan los espacios verdes desde la perspectiva de la regulación ambiental, en particular, la calidad del aire, la gestión del agua y el albedo.

En este contexto, el estudio de Muscas et al. (2025) aborda el papel del albedo, entendido como la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar, en la mitigación del calentamiento urbano. Este concepto es clave en las islas de calor urbanas, que se producen por la presencia de superficies impermeables, como el asfalto, que absorben una mayor cantidad de calor (Muscas et al., 2025). Para estudiar este fenómeno, los autores utilizan una metodología centrada en el forzamiento radiactivo, que convierte los cambios en el albedo en términos de compensación de CO₂ equivalente (CO₂eq). Al analizar diversas superficies urbanas, como el asfalto, el césped y las copas de árboles en parques, se muestra que los árboles ofrecen beneficios evidentes al sustituir

superficies de bajo albedo, como el pavimento, al disminuir la absorción de calor (Muscas et al., 2025). Sin embargo, los resultados demuestran que, al compararse con el césped seco, que posee un albedo más alto, los árboles pueden presentar valores negativos de reflectividad, lo que concluye que el albedo por sí solo no es un indicador suficiente para evaluar los beneficios ambientales de la vegetación (Muscas et al., 2025). Por consiguiente, al integrar otros servicios ecosistémicos, como la evapotranspiración y el secuestro de carbono, los árboles presentan beneficios mucho mayores, hasta 50 veces más eficaces en la regulación climática. Este hallazgo se relaciona con los demás estudios del grupo, ya que refuerza la necesidad de analizar los servicios ecosistémicos de manera integral y no de forma aislada.

De manera complementaria, Sánchez-Almodóvar et al. (2023) analizan la regulación hídrica en entornos urbanos, con énfasis en los riesgos de inundación derivados del cambio climático y de la impermeabilización del suelo, propiciando la transición de esta infraestructura gris a sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) y a SbN. Por lo tanto, el estudio de caso se realizó en tres ciudades españolas: Alicante, Torrevieja y Benidorm. Allí emplearon estrategias contra las inundaciones como parques inundables, tanques de almacenamiento y balsas de laminación que permiten retener el agua lluvia y promover su reutilización (Sánchez-Almodóvar et al., 2023).

En lo que respecta a la calidad del aire, J. Lee et al. (2023) analizan la capacidad de los árboles para capturar material particulado (PM10 y PM2.5), uno de los contaminantes más nocivos en las áreas urbanas. Mediante un experimento controlado, los autores comparan especies con diferentes características foliares y demuestran que la eficiencia de adsorción de partículas depende de factores como la rugosidad de la hoja, el tamaño de las estomas, el contenido de cera y procesos fisiológicos, como la transpiración. Estos hallazgos se relacionan directamente con

Vieira et al. (2018), quienes señalan que la efectividad de los espacios verdes depende de su composición y de sus características ecológicas.

En síntesis, los cuatro artículos coinciden en que los servicios ecosistémicos urbanos, como la regulación térmica, hídrica y de calidad del aire, se deben a interacciones complejas entre la vegetación, las superficies y la gestión urbana. Además, Muscas et al. (2025) destacan la evaluación del albedo junto con otros procesos, mientras que Sánchez-Almodóvar et al. (2023) muestran el potencial de SbN para gestionar el agua, finalmente, J. Lee et al. (2023) y Vieira et al. (2018) subrayan que la efectividad de estos servicios depende de las características físicas y estructurales de la vegetación.

4.3.2 Indicadores técnicos

4.3.2.1 Grupo A: Optimización con inteligencia artificial (IA)

Esta categoría aborda el uso de la inteligencia artificial como herramienta clave para mejorar la gestión y la planificación de la infraestructura verde urbana. Mediante el análisis de grandes volúmenes de datos es posible identificar patrones complejos y optimizar el diseño estratégico urbano (Shaamala et al., 2025; Wei & Cheng, 2022).

Diversos enfoques para la gestión de la vegetación urbana han sido reportados en la literatura (Wei & Cheng, 2022; Shaamala et al., 2025). Por un lado, se ha reportado que el diámetro del tronco y el área foliar de los árboles funcionan como indicadores para evaluar su aporte real a los servicios ecosistémicos (Wei & Cheng, 2022). Mientras que Shaamala et al. (2025), a partir de un modelo basado en inteligencia artificial complementado con optimización por colonia de hormigas y simulaciones microclimáticas, demostraron que la distribución de árboles con copas amplias en zonas de alta exposición solar contribuye significativamente al mejoramiento de la sensación térmica, medida esta mediante el índice UTCI (Universal Thermal Climate Index). Este

resultado demuestra que la cantidad de árboles no es un factor determinante para la efectividad de la adopción de infraestructura verde; además, deben considerarse su ubicación, sus características estructurales y la selección de especies.

Al integrar ambos estudios, se evidencia que la inteligencia artificial es una herramienta utilizada en la gestión urbana contemporánea, que permite analizar el estado actual de los ecosistemas urbanos y optimizar futuras intervenciones. En detalle, el primer estudio se centra en la evaluación y el diagnóstico de los servicios ecosistémicos, mientras que el segundo está más orientado a la planificación y el diseño de estrategias de mitigación térmica. Asimismo, en ambos estudios se destaca que la implementación de la inteligencia artificial no solo mejora la capacidad de análisis de datos complejos, sino que también fortalece la toma de decisiones estratégicas, contribuyendo al desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes.

4.3.2.2 Grupo B: Herramientas y modelos de planificación espacial

Dentro de esta categoría se agrupan estudios que desarrollan herramientas y modelos espaciales orientados a mejorar la planificación de la infraestructura verde urbana, integrando variables ecológicas, sociales y climáticas para apoyar la toma de decisiones. Aunque los tres artículos comparten este propósito general, cada uno aborda el problema desde enfoques distintos pero complementarios, lo que permite comprender la evolución de estas herramientas desde modelos analíticos hasta sistemas interactivos y predictivos.

Por ejemplo, Meerow (2019) señala que las interacciones espaciales y funcionales enmarcan la prestación de servicios ecosistémicos mediante infraestructura verde, capaz de relacionar y compensar acciones de servicios como la regulación térmica, la calidad del aire y la conectividad ecológica, evitando que estos servicios sean evaluados individualmente. Adicionalmente, la inclusión de valoraciones ponderadas con enfoques participativos, como los

procesos de análisis jerárquico (AHP), asegura el fortalecimiento de decisiones informadas al adaptar las priorizaciones espaciales de intervención en contextos específicos. Por otro lado, Campagnaro et al. (2019) identificaron los retos asociados a la equidad ambiental, señalando desigualdades en la distribución de espacios verdes y que hay más de estos espacios en zonas periféricas que en zonas centrales de las ciudades. Además, el estudio concluye que la gestión urbana efectiva exige diagnósticos estructurales detallados. Por otro lado, Rakholia et al. (2025) proponen y demuestran que las herramientas avanzadas en IA amplían las capacidades de planificación ecosistémica urbana al incluir en tiempo real, usando enfoques como TreeGrid, servicios ecosistémicos y biodiversidad, mostrando que la efectividad de la infraestructura verde está en función de su ubicación y otros atributos funcionales de las especies.

En conjunto, los tres estudios presentan una relación complementaria en términos de escala y enfoque metodológico. Por un lado, Meerow (2019) propone identificar prioridades espaciales y analizar las interacciones entre servicios ecosistémicos a escala de ciudad; Campagnaro et al. (2019) aportan herramientas de diagnóstico detallado mediante indicadores que facilitan la gestión a escala local; y Rakholia et al. (2025) introducen herramientas avanzadas de simulación y predicción que permiten diseñar intervenciones específicas y evaluar sus impactos en tiempo real.

De esta manera, se evidencia que la planificación de la infraestructura verde urbana puede abordarse como un proceso integral que inicia con la identificación de áreas prioritarias y de las relaciones entre variables (Meerow, 2019), continúa con el diagnóstico detallado de las condiciones locales (Campagnaro et al., 2019) y finaliza con el diseño y optimización de soluciones mediante herramientas avanzadas basadas en simulación e inteligencia artificial (Rakholia et al., 2025). Este enfoque integrado podría contribuir al desarrollo de ciudades más sostenibles, resilientes y adaptadas a los desafíos del cambio climático.

4.3.2.3 Grupo C: Indicadores y metodologías de evaluación

En este grupo se incluyeron los estudios que desarrollan formas concretas de medir y evaluar cómo la infraestructura verde urbana, como los parques, los árboles o los suelos permeables, contribuye a disminuir la temperatura de las ciudades. Estos artículos proponen herramientas metodológicas e indicadores que permiten cuantificar y comparar ciudades, lo cual resulta clave para la planificación urbana. Lauwaet et al. (2024) enfocan su estudio en una modelación climática de alta resolución para analizar la isla de calor urbana en 100 ciudades europeas. Este estudio parte del problema de que muchos estudios anteriores no tenían suficiente detalle espacial, lo que dificultaba entender la variación de la temperatura dentro de la ciudad. Para resolverlo, los autores utilizaron el modelo UrbClim, que permite simular la temperatura del aire con una resolución de 100 metros y con datos horarios durante un periodo de 10 años (2008-2027). A partir de esta modelación, los autores construyen un indicador de UHI que permite comparar ciudades entre sí. Este se basa en el percentil 90 de la diferencia de temperatura entre zonas urbanas y rurales. Además, analizaron su relación con variables como la vegetación, el sellado del suelo y la densidad poblacional. El análisis muestra que las superficies impermeables incrementan el UHI, mientras que la vegetación lo reduce, lo que evidencia que la infraestructura verde ya genera un enfriamiento significativo y que existe un potencial adicional al fortalecer estas estrategias.

Syrbe et al. (2024), proponen un indicador del servicio ecosistémico de regulación climática, aplicado a ciudades alemanas. Este indicador integra la oferta, que es la capacidad de enfriamiento de las áreas verdes, y la demanda, que corresponde a la población beneficiaria, mediante datos espaciales de alta resolución. Los resultados muestran desigualdades en el acceso al enfriamiento urbano y permiten identificar zonas que requieren intervenciones prioritarias. Ambos estudios son complementarios, ya que Lauwaet et al. (2024) responden a la pregunta

¿cuánto se reduce la temperatura en la ciudad? mientras que Syrbe et al. (2024) a “qué población se beneficia de esta reducción”. En este sentido, ambos estudios coinciden en la importancia del uso de datos de alta resolución, lo que permite realizar análisis a escala de barrio y mejorar la planificación urbana. Estos artículos señalan que la evaluación del enfriamiento urbano debe integrar tanto modelos climáticos como indicadores espaciales y sociales con el fin de lograr un análisis más completo, aplicable y orientado a la toma de decisiones.

4.4 Marco de referencia

La *Tabla 2* presenta el marco de referencia elaborado a partir del análisis de los 42 artículos seleccionados. En ella se organizan los indicadores ambientales (regulación térmica, servicios ecosistémicos, biodiversidad, funcionalidad de los espacios verdes y servicios de regulación específica) y los indicadores técnicos (optimización con IA, herramientas de planificación espacial e indicadores de evaluación). Para cada uno se especifican los indicadores clave, las SbN asociadas, las herramientas o métodos utilizados y las referencias principales. Este marco permite visualizar de manera integrada y resumida el estado actual del conocimiento sobre la evaluación de SbN en parques urbanos resilientes.

Tabla 2. *Marco de referencia construido.*

Categoría	Criterio/Grupo	Indicadores identificados	SbN asociadas	Herramientas/Métodos	Referencias
INDICADORES AMBIENTALES					
1. Regulación térmica y mitigación de islas de calor	UHI, regulación del aire	LST, UCM	Aumento del dosel arbóreo, techos verdes, infraestructura verde	TreeNet, InVEST, ENVI-met, Google Earth Engine	(Zaerpour et al., 2025), (Chung & Sung, 2025), (Y. Lee et al., 2025), (Bai & Xing, 2025), (Karami & Mousavi, 2025), (Lauwaet et al., 2024), (Wong et al., 2024), (Schmidt & Walz, 2021), (Ranagalage et al., 2020), (Shaamala et al., 2025)
2. Evaluación y cuantificación de servicios ecosistémicos	Captura de carbono, calidad del aire, escorrentía	NDVI, valor económico (USD)	Infraestructura verde y azul, corredores verdes	iTree-Eco, LiDAR	(Busca et al., 2025), (Dong et al., 2025), (Xu & Ding, 2025), (De

Categoría	Criterio/Grupo	Indicadores identificados	SbN asociadas	Herramientas/Métodos	Referencias
3. Biodiversidad, conectividad y composición ecológica	Diversidad de especies, conectividad ecológica	NDVI, tipos funcionales, funcionalidad ecológica	Espacios verdes urbanos, bosques urbanos, especies resilientes	Sensores remotos, análisis espacial SIG	<p>Montis et al., 2025), (Gan et al., 2024), (Syrbe et al., 2024), (Suhardono et al., 2024), (E. Lee & Kim, 2023), (Peng et al., 2022), (Boehnke et al., 2022), (Cortinovis & Geneletti, 2018), (Kim, 2016), (Wei & Cheng, 2022)</p> <p>(Y. Lee et al., 2025), (Grilo et al., 2025), (Jeong & Park, 2024), (Zhang et al., 2023), (Kunakh et al., 2022), (Rakholia et al., 2025), (Vieira et al.,</p>

Categoría	Criterio/Grupo	Indicadores identificados	SbN asociadas	Herramientas/Métodos	Referencias
					2018)
4. Regulación térmica y funcionalidad de los espacios verdes urbanos	Evapotranspiración, justicia ambiental	Tasa de evapotranspiración, NDVI, cobertura arbórea	Cobertura vegetal densa, accesibilidad a parques	Satélites GOES-16, modelos socioespaciales	(Sun et al., 2025), (Y. Lee et al., 2025), (Tieskens et al., 2022), (Guo et al., 2022), (Fletcher et al., 2021), (Vail Castro, 2022), (Badura et al., 2021), (Meerow, 2019)
5. Servicios específicos de regulación	Albedo, gestión hídrica, calidad del aire	CO ₂ eq, captura de material particulado (PM10 Y PM2.5), volumen de agua retenido CO ₂ eq, captura de material particulado (PM10 y PM2.5), volumen de agua retenido	Parques inundables, espacios verdes	forzamiento radiativo, SUDS, experimentos foliares	(Muscas et al., 2025), (Sánchez-Almodóvar et al., 2023), (J. Lee et al., 2023), (Vieira et al., 2018)

INDICADORES TECNICOS					
Categoría	Criterio/Grupo	Indicadores identificados	SbN asociadas	Herramientas/Metodos	Referencias
A. Optimización con inteligencia artificial (IA)	Optimización espacial, diagnóstico funcional	DBH, área foliar, índice de ganancia hipotérmica, UTCI	Selección de especies por confort térmico	SOM, simulación microclimática	(Shaamala et al., 2025) , (Wei & Cheng, 2022)
B. Herramientas y modelos de planificación espacial	Simulación en tiempo real, multicriterio, diagnóstico intraurbano	Coefficiente de Gini, densidad arbórea, impermeabilización del suelo	Infraestructura verde y azul	GISP (SIG+AHP), TreeGrid, DNN	(Rakholia et al., 2025), (Meerow, 2019), (Campagnaro et al., 2019)
C. Indicadores y metodologías de evaluación	Indicadores comparables, equidad térmica	Indicador de UHI, capacidad de enfriamiento	Infraestructura verde a escala de barrio	UrbClim, SIG de alta resolución	(Wei & Cheng, 2022) , (Lauwaet et al., 2024)

4.5 Tendencias y lagunas

4.5.1 Tendencias

En primer lugar, se ha evidenciado un notable crecimiento en la producción científica a partir de 2022. Este incremento se acompaña de una mayor diversificación temática, en la que las SbN ya no se abordan exclusivamente desde la ecología, sino también desde disciplinas como la planificación urbana, la ingeniería, la modelación climática y la inteligencia artificial.

Una segunda tendencia destacada es el uso cada vez más extendido de herramientas geoespaciales y tecnologías avanzadas, como imágenes satelitales, plataformas como Google Earth Engine, modelos de simulación microclimática y algoritmos de aprendizaje automático, entre otros. Estas herramientas permiten analizar fenómenos como las islas de calor urbano con mayor precisión tanto espacial como temporal, proporcionando así un soporte más sólido para la toma de decisiones basada en datos. Además, facilitan la traducción de los beneficios ambientales en métricas cuantificables, lo que mejora su integración en los procesos de planificación urbana. Otra tendencia es el reconocimiento de la multifuncionalidad de la infraestructura verde.

Los espacios urbanos ya no se perciben únicamente como elementos con funciones ecológicas, sino también como fundamentales para fomentar el bienestar tanto de las personas como de las ciudades en general. Finalmente, se observa un avance significativo en el uso de modelos de optimización y planificación espacial que integran enfoques multicriterio, inteligencia artificial y herramientas interactivas como GISP o TreeGrid. Estas tecnologías permiten diseñar intervenciones más eficientes y adaptadas a contextos urbanos específicos.

4.5.2 Lagunas

A pesar de los avances alcanzados, persisten diversas limitaciones y vacíos que representan oportunidades para futuras investigaciones. La principal brecha como se indica en la Tabla 3 es la

escasez de estudios en contextos latinoamericanos, dado que la producción científica se concentra mayoritariamente en países como China, Estados Unidos y Europa. Esta situación limita la aplicabilidad de los resultados obtenidos en ciudades con características climáticas y urbanas distintas, como ocurre en Colombia.

Tabla 3.

Distribución de los artículos por países.

País	Documentos publicados por país
China	8
Italia	7
Corea del Sur y Estados Unidos	6
Reino Unido y Alemania	5
Australia	3
India, Portugal y España	2
Japón, Suiza, Israel, Zambia, etc.	1

Otra importante carencia es la evaluación a largo plazo limitada de las SbN. La mayoría de los estudios se apoyan en simulaciones o en análisis de corto alcance, sin considerar factores como el comportamiento dinámico de la vegetación, el mantenimiento de la infraestructura verde o las transformaciones en el uso del suelo a lo largo del tiempo. Asimismo, se ha identificado la falta de estandarización metodológica, ya que los estudios recurren a distintos indicadores, escalas y técnicas de análisis. Esto complica tanto la comparación de resultados como la elaboración de conclusiones consistentes y generalizables.

5 Conclusiones

El presente trabajo de investigación, **mediante una revisión bibliográfica sistemática, estableció un marco de referencia (tabla 2) integral sobre la importancia de las SbN en los parques urbanos para la adaptación de las ciudades a los desafíos del cambio climático.** En respuesta al objetivo general, el marco de referencia logrado trasciende una recopilación bibliográfica; constituyendo una herramienta conceptual y metodológica que permite a futuras investigaciones comprender no solo qué son las SbN y para qué sirven, sino también cómo evaluar su desempeño y dónde priorizar su implementación para optimizar los resultados y la resiliencia de las ciudades. Las principales conclusiones asociadas a los objetivos específicos son:

El análisis bibliométrico reveló un crecimiento exponencial de la literatura científica a partir de 2022, lo que se consolidó en 2025 como un tema de interés global. No obstante, evidenció una brecha geográfica crítica (tabla 3): América Latina se encuentra insuficientemente representada en la literatura, a pesar de no estar al margen de la relevancia de las SbN.

La categorización de los 42 artículos seleccionados permitió establecer dos grandes grupos: enfoques ambientales y técnicos (figura 4).

En relación con los enfoques ambientales identificados en la clasificación de 33 artículos, se observó una clara tendencia hacia la evaluación integral y simultánea de la funcionalidad ecológica de los espacios verdes. Los estudios agrupados en las cinco subcategorías regulación térmica, servicios ecosistémicos, biodiversidad, justicia ambiental y servicios de regulación específica coinciden en que la infraestructura verde, azul y los espacios verdes urbanos deben analizarse de manera conjunta, ya que su efectividad depende de interacciones complejas entre estos componentes. En particular, **las estrategias más documentadas y validadas por los investigadores son aquellas que potencian los procesos de**

evapotranspiración, el aumento del dosel arbóreo y la implementación de techos verdes, consolidándose como pilares fundamentales para mitigar los efectos del cambio climático en entornos urbanos.

En relación con el enfoque técnico y los tres grupos identificados, se concluye que la evaluación y la planificación de SbN en parques urbanos han avanzado significativamente mediante el uso de herramientas modernas que posibilitan una toma de decisiones más precisa y eficiente. **La integración de modelos geoespaciales, metodologías multicriterio, indicadores cuantificables y técnicas de inteligencia artificial no solo mejora el diagnóstico del estado actual de la infraestructura verde, sino que también permite optimizar tanto su diseño como su ubicación.** Además, estos enfoques técnicos permiten manejar grandes volúmenes de datos y analizar interacciones complejas entre variables urbanas y ambientales, lo que incrementa la capacidad de predecir y simular diversos escenarios. Por tanto, estos criterios técnicos se consolidan como un componente esencial para garantizar la efectividad, el monitoreo y la sostenibilidad de las SbN.

Finalmente, la revisión permitió identificar los indicadores más comúnmente utilizados para evaluar la efectividad de las SbN en parques urbanos. En el ámbito ambiental, destacan los asociados a la regulación térmica, como la temperatura superficial del suelo (LST), estimada a partir de imágenes del satélite Landsat, y el índice universal de clima térmico (UTCI), que mide el estrés térmico percibido. En la misma línea, aparecen los servicios ecosistémicos para los que se usan métricas como la captura de carbono (i-Tree Eco, Invest), la eliminación de contaminantes (kg/año de PM, Nox) y la reducción de la escorrentía. Para la biodiversidad y la estructura ecológica, los indicadores recurrentes son el índice de vegetación normalizado (NDVI), el índice de área foliar (LAI) y la conectividad ecológica medida por la distancia entre parches y el tamaño

de las áreas verdes. En cuanto a los indicadores técnicos, se identificó una tendencia hacia el uso de métricas de diagnóstico estructural, como el DBH y el área foliar, que permiten evaluar la funcionalidad de los árboles a escala individual, así como de métricas de optimización, como el coeficiente de Gini, que incorporan criterios de equidad en la planificación. La identificación de estos indicadores constituye un aporte metodológico para la evaluación de SbN, al ofrecer un conjunto de métricas validadas que pueden ser adoptadas en contextos de planificación urbana con limitaciones de datos. Se recomienda a futuras investigaciones se enfoquen en el desarrollo de estudios aplicados en América latina particularmente en ciudades colombianas, así como en la implementación de marcos metodológicos unificados y evaluaciones de largo plazo que permitan comprender el comportamiento dinámico de las SbN y optimizar su incorporación en la planificación urbana sostenible.

6 Referencias Bibliográficas

- Badura, T., Krkoška Lorencová, E., Ferrini, S., & Vačkářová, D. (2021). Public support for urban climate adaptation policy through nature-based solutions in Prague. *Landscape and Urban Planning*, 215. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104215>
- Bai, Y., & Xing, Y. (2025). Harnessing green infrastructure for urban heat island mitigation: Evidence-based strategies for sustainable and climate-resilient cities. *Sustainable Cities and Society*, 133. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106843>
- Boehnke, D., Krehl, A., Mörmann, K., Volk, R., Lützkendorf, T., Naber, E., Becker, R., & Norra, S. (2022). Mapping Urban Green and Its Ecosystem Services at Microscale—A Methodological Approach for Climate Adaptation and Biodiversity. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su14159029>
- Burgos-Ayala, A., Jiménez-Aceituno, A., & Rozas-Vásquez, D. (2022). Lessons learned and challenges for environmental management in Colombia: The role of communication, education and participation strategies. *Journal for Nature Conservation*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126281>
- Busca, F., Revelli, R., Gómez Villarino, M., López-Santiago, J., & Gómez-Villarino, M. T. (2025). The interconnection between urban green areas and cultural ecosystem services: A case study in Boadilla del Monte (Spain). *Sustainable Futures*, 10. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101265>
- Campagnaro, T., Sitzia, T., Cambria, V. E., & Semenzato, P. (2019). Indicators for the planning and management of urban green spaces: A focus on public areas in Padua, Italy. *Sustainability (Switzerland)*, 11(24). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su11247071>

- Chung, J., & Sung, K. (2025). Effects on heat mitigation, energy use, and carbon savings in urban-scale implementations of nature-based solutions. *Geography and Sustainability*, 6(6). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2025.100362>
- Cortinovis, C., & Geneletti, D. (2018). Mapping and assessing ecosystem services to support urban planning: A case study on brownfield regeneration in Trento, Italy. *One Ecosystem*, 3. Scopus. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e25477>
- De Montis, A., Ledda, A., Serra, V., Manunta, A., & Calia, G. (2025). Urban Green Spaces and Climate Changes: Assessing Ecosystem Services for the Municipality of Sassari (Italy). *Land*, 14(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/land14061308>
- Dong, T., Tadi, M., & Tesfaye, S. T. (2025). Unveiling Hidden Green Corridors: An Agent-Based Simulation (ABS) of Urban Green Continuity for Ecosystem Services and Climate Resilience. *Smart Cities*, 8(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050163>
- Fletcher, D. H., Likongwe, P. J., Chiotha, S. S., Nduwayezu, G., Mallick, D., Uddin Md, N., Rahman, A., Golovátina-Mora, P., Lotero, L., Bricker, S., Tsirizeni, M., Fitch, A., Panagi, M., Ruiz Villena, C., Arnhardt, C., Vande Hey, J., Gornall, R., & Jones, L. (2021). Using demand mapping to assess the benefits of urban green and blue space in cities from four continents. *Science of the Total Environment*, 785. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147238>
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M. J., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., Walsh, C., Noble, K., Van Wyk, E., Ordóñez, C., Oke, C., & Pintér, L. (2019). Nature-based solutions for urban climate change adaptation: Linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making. *BioScience*, 69(6), 455-466. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz042>

- Gan, H., Feng, J., Zhao, Z., Ma, L., Di, S., & Wen, Y. (2024). Identifying the Response of Ecological Well-Being to Ecosystem Services of Urban Green Space Using the Coupling Coordination Degree Model: A Case Study of Beijing, China, 2015–2023. *Forests*, *15*(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f15091494>
- Grilo, F., McPhearson, T., Aleixo, C., Santos-Reis, M., & Branquinho, C. (2025). Urban trees through a functional traits' lens: Exploring the interplay between tree functional groups and social-ecological factors. *Urban Forestry and Urban Greening*, *107*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128749>
- Guo, X., Wang, J., & Wu, X. (2022). Study on Residents' Satisfaction and Green Development of City Parks in Linfen, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, *31*(4), 3051-3062. Scopus. <https://doi.org/10.15244/pjoes/145188>
- Jaiswal, A., Sagar, R., Pandey, A., Yadav, D., Ansari, Mohd. S., & Rawat, R. (2024). Building Resilient Urban Futures: Adapting Cities to Climate Change Challenges. En *Urban Sustainability: Part F3945* (pp. 51-68). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9658-8_3
- Jeong, J., & Park, C.-R. (2024). Urban forest indicator assessment for nature-based solutions to connect biodiversity and people. *Ecological Indicators*, *169*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112843>
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Haase, D., Knapp, S., Korn, H., Stadler, J., Zaunberger, K., & Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, *21*(2). <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>

Karami, P., & Mousavi, S.-M. (2025). Spatiotemporal analysis of thermal islands in a semi-arid city: A case study of Kermanshah, Iran using machine learning and remote sensing.

Environmental Challenges, 20. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101174>

Kim, G. (2016). Assessing urban forest structure, ecosystem services, and economic benefits on vacant land. *Sustainability (Switzerland)*, 8(7). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/su8070679>

Kunakh, O. M., Ivanko, I. A., Holoborodko, K. K., Lisovets, O. I., Volkova, A. M., Nikolaieva, V. V., & Zhukov, O. V. (2022). Modeling the spatial variation of urban park ecological properties using remote sensing data. *Biosystems Diversity*, 30(3), 213-225. Scopus.

<https://doi.org/10.15421/012223>

Lauwaet, D., Berckmans, J., Hooyberghs, H., Wouters, H., Driesen, G., Lefebvre, F., & de Ridder, K. (2024). High resolution modelling of the urban heat island of 100 European cities.

Urban Climate, 54. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101850>

Lee, E., & Kim, G. (2023). Green Space Ecosystem Services and Value Evaluation of Three-Dimensional Roads for Sustainable Cities. *Land*, 12(2). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/land12020505>

Lee, J., Kwak, M. J., & Woo, S. Y. (2023). Adsorption of particulate matter and uptake of metal and non-metal elements from PM in leaves of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*: A comparative study. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. Scopus.

<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1301533>

Lee, Y., Jegal, S., Lee, S., Son, B., & Im, J. (2025). Impact of Urban Tree Canopy on Land Surface Temperature and Green Space Inequities in Suwon, South Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*, 41(5), 843-857. Scopus.

<https://doi.org/10.7780/kjrs.2025.41.5.11>

- Meerow, S. (2019). A green infrastructure spatial planning model for evaluating ecosystem service tradeoffs and synergies across three coastal megacities. *Environmental Research Letters*, 14(12). Scopus. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab502c>
- Muscas, D., Bonciarelli, L., Filipponi, M., Orlandi, F., & Fornaciari, M. (2025). Urban Tree CO2 Compensation by Albedo. *Land*, 14(8). Scopus. <https://doi.org/10.3390/land14081633>
- Negrello, M. (2023). Designing with Nature Climate-Resilient Cities: A Lesson from Copenhagen. En *Urban Book Series: Part F813* (pp. 853-862). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7_76
- Peng, L., Zhang, L., Li, X., Wang, P., Zhao, W., Wang, Z., Jiao, L., & Wang, H. (2022). Spatio-Temporal Patterns of Ecosystem Services Provided by Urban Green Spaces and Their Equity along Urban–Rural Gradients in the Xi’an Metropolitan Area, China. *Remote Sensing*, 14(17). Scopus. <https://doi.org/10.3390/rs14174299>
- Pradilla, G., & Hack, J. (2024). An urban rivers renaissance? Stream restoration and green–blue infrastructure in Latin America – Insights from urban planning in Colombia. *Urban Ecosystems*, 27(6), 2245-2265. <https://doi.org/10.1007/s11252-024-01571-9>
- Rakholia, S., Yosef, R., Yadav, N., Karimloo, L., Pleitner, M., & Kothari, R. (2025). TreeGrid: A Spatial Planning Tool Integrating Tree Species Traits for Biodiversity Enhancement in Urban Landscapes. *Animals*, 15(13). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ani15131844>
- Ranagalage, M., Ratnayake, S. S., Dissanayake, D. M. S. L. B., Kumar, L., Wickremasinghe, H., Vidanagama, J., Cho, H., Udagedara, S., Jha, K. K., Simwanda, M., Phiri, D., Perera, E. N. C., & Muthunayake, P. (2020). Spatiotemporal variation of urban heat islands for implementing nature-based solutions: A case study of kurunegala, Sri Lanka. *ISPRS*

International Journal of Geo-Information, 9(7). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/ijgi9070461>

Sánchez-Almodóvar, E., Olcina-Cantos, J., Martí-Talavera, J., Prieto-Cerdán, A., & Padilla-Blanco, A. (2023). Floods and Adaptation to Climate Change in Tourist Areas: Management Experiences on the Coast of the Province of Alicante (Spain). *Water (Switzerland)*, 15(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w15040807>

Schmidt, K., & Walz, A. (2021). Ecosystem-based adaptation to climate change through residential urban green structures: Co-benefits to thermal comfort, biodiversity, carbon storage and social interaction. *One Ecosystem*, 6. Scopus. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e65706>

Shaamala, A., Yigitcanlar, T., Nili, A., & Nyandega, D. (2025). Algorithmic urban greening for thermal resilience: AI-optimised tree placement and species selection. *Cities*, 167. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106356>

Suhardono, S., Safitri, F. E., Rachmalia, F., Rizky, F. A., Khairunnisa, D. H., Septiariva, I. Y., & Suryawan, I. W. K. (2024). Assessing the Ecological Function Effectiveness of Urban Parks in Surakarta City, Indonesia. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 25(4), 227-240. Scopus. <https://doi.org/10.12912/27197050/183790>

Sun, Y., Wang, W., Wang, C., Wang, X., Yang, D., Liang, H., Gao, D., Qiu, L., & Gao, T. (2025). Synergies and trade offs of ecological and social values across different biotopes in urban green spaces: A case study of Xi'an, China. *Scientific Reports*, 15(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04255-2>

Syrbe, R.-U., Meier, S., Moyzes, M., Dworczyk, C., & Grunewald, K. (2024). Assessment and Monitoring of Local Climate Regulation in Cities by Green Infrastructure—A National

- Ecosystem Service Indicator for Germany. *Land*, 13(5). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/land13050689>
- Tieskens, K. F., Smith, I. A., Jimenez, R. B., Hutyra, L. R., & Fabian, M. P. (2022). Mapping the gaps between cooling benefits of urban greenspace and population heat vulnerability. *Science of the Total Environment*, 845. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157283>
- Vail Castro, C. (2022). Optimizing nature-based solutions by combining social equity, hydro-environmental performance, and economic costs through a novel Gini coefficient. *Journal of Hydrology X*, 16. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100127>
- Vieira, J., Matos, P., Mexia, T., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Correia, O., Santos-Reis, M., Branquinho, C., & Pinho, P. (2018). Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services: The case of urban parks. *Environmental Research*, 160, 306-313. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.006>
- Wei, S., & Cheng, S. (2022). An artificial intelligence approach for identifying efficient urban forest indicators on ecosystem service assessment. *Frontiers in Environmental Science*, 10. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.994389>
- Wong, G. K. L., Ma, A. T. H., Cheung, L. T. O., Lo, A. Y., & Jim, C. Y. (2024). Visiting urban green space as a climate-change adaptation strategy: Exploring push factors in a push-pull framework. *Climate Risk Management*, 43. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100589>
- Xu, M., & Ding, L. (2025). Ecosystem Service Assessment of Campus Street Trees for Urban Resilience: A Case Study from Guangxi Arts University. *Forests*, 16(9). Scopus.

<https://doi.org/10.3390/f16091465>

Yang, G., Zhang, P., Yu, F., & Zhu, X. (2023). A review on resilient cities research from the perspective of territorial spatial planning: A bibliometric analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1300764>

Zaerpour, M., Papalexiou, S. M., & Pietroniro, A. (2025). Increasing tree canopy lowers urban air temperature by up to 1.5 °C in heat-prone areas. *Npj Urban Sustainability*, 5(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s42949-025-00277-x>

Zhang, H.-L., Guo, L.-Y., Nizamani, M. M., & Hua-Feng, H.-F. (2023). Distribution patterns and drivers of urban green space and plant diversity in Haikou, China. *Frontiers in Plant Science*, 14. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1202115>

