

COSTO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EDIFICIOS: EVIDENCIA RECIENTE SOBRE MATERIALES, RETROFITTING Y GESTIÓN ENERGÉTICA (2021-2025)

COST OF THE CARBON FOOTPRINT IN BUILDINGS: RECENT EVIDENCE ON MATERIALS, RETROFITTING AND ENERGY MANAGEMENT (2021-2025)

Wilson Eduardo Jaramillo Sangurima¹

wijaramillosa@uide.edu.ec¹

Fecha de recepción: 07/04/2026 / Fecha de aceptación: 16/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: Este artículo analiza el costo de la huella de carbono asociada a la construcción y funcionamiento de los edificios y responde a la pregunta de qué estrategias de diseño, selección de materiales, sistemas constructivos y gestión operacional permiten minimizar dicho costo sin comprometer el desempeño técnico ni económico. Se empleó un análisis bibliométrico y documental de 482 publicaciones indexadas en Scopus entre 2021 y 2025, complementado con mapas de co-ocurrencia de términos generados mediante software de visualización científica y una revisión crítica de los trabajos más citados sobre el ciclo de vida, la eficiencia energética y los materiales de baja huella. Los resultados muestran cinco grupos temáticos articulados en torno a sistemas energéticos en edificios, evaluación económico-ambiental con apoyo de BIM y análisis de ciclo de vida, transición industrial baja en carbono, materiales cementicios derivados de residuos y procesos hídricos vinculados a infraestructuras edilicias. En conjunto, estos núcleos evidencian un cambio desde enfoques parciales hacia un paradigma de optimización multicriterio en el que la huella de carbono se incorpora como variable de diseño al mismo nivel que el costo y el desempeño funcional. Se concluye que la principal contribución del estudio es ofrecer una síntesis estructurada del estado del arte que permite identificar líneas robustas de actuación para reducir el costo de la huella de carbono, especialmente en materiales, retrofitting y gestión energética y al mismo tiempo, delimitar vacíos relativos a equidad, gobernanza urbana y comportamiento de los usuarios, que orientan futuras investigaciones en el ámbito de los edificios bajos en carbono.

Palabras clave: *Edificios sostenibles, huella de carbono, evaluación del ciclo de vida, eficiencia energética, materiales de construcción*

¹Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) – Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-4058-5053>; +5930995460901

ABSTRACT: This paper examines the cost of the carbon footprint associated with the construction and operation of buildings and addresses the question of which design, material selection, construction system and operational management strategies can minimise that cost without undermining technical or economic performance. A bibliometric and documentary analysis of 482 publications indexed in Scopus between 2021 and 2025 was carried out, combining critical reading of the most cited works on life-cycle assessment, energy efficiency and low-carbon materials with term co-occurrence maps generated using scientific visualisation software. The results reveal five thematic clusters centred on building energy systems, economic-environmental assessment supported by BIM and life-cycle analysis, low-carbon industrial transition, cementitious materials based on wastes and water-related processes in building infrastructures. Taken together, these clusters indicate a shift from fragmented approaches to a multi-criteria optimisation paradigm in which the carbon footprint becomes a design variable on a par with cost and functional performance. The study concludes that its main contribution is to provide a structured synthesis of the state of the art that highlights robust lines of action to reduce the cost of the carbon footprint—especially in materials, retrofit strategies and energy management—while identifying gaps related to equity, urban governance and user behaviour that can guide future research on low-carbon buildings.

Keywords: *Sustainable buildings, carbon footprint, life cycle assessment, energy efficiency, building materials*

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción y la operación de edificios es uno de los principales responsables de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, representando una proporción muy significativa del consumo energético mundial y de la huella de carbono antropogénica (1). Esta realidad ha generado una creciente presión científica, normativa y económica para que el diseño, la construcción y el funcionamiento de las edificaciones incorporen criterios explícitos de reducción del carbono incorporado y operacional, al tiempo que se controlan los costos a lo largo del ciclo de vida (2). En este sentido, una búsqueda bibliométrica en la base de datos Scopus (3) con respecto a esta temática, permite identificar los clústeres temáticos del tema investigado utilizando herramientas como el software libre VOSviewer (4).

El concepto de costo de la huella de carbono surge de la convergencia entre la evaluación del ciclo de vida (LCA) y el análisis del costo del ciclo de vida (LCC). Myint y Shafique muestran que las emisiones de carbono incorporado, incrustadas en materiales y procesos constructivos, representan una fracción relevante de las emisiones totales de un edificio durante su vida útil, especialmente a medida que se incrementa la eficiencia energética operacional (5). Este hallazgo subraya que la reducción del costo ambiental no puede limitarse a la fase de uso: las decisiones tempranas de diseño estructural y selección de materiales tienen consecuencias duraderas sobre la huella total y su valoración económica (1,5). En esta línea, Joensuu et al. advierten que la evaluación del ciclo de vida de los edificios en el contexto de la economía circular presenta aún brechas metodológicas, en particular respecto a los componentes diseñados para ser desmontados y reutilizados (6). Jalaei et al., propusieron un marco para la especificación de

materiales de construcción de bajo carbono en procesos de contratación pública, demostrando que es posible reducir la huella incorporada sin incrementos significativos de costos cuando las exigencias se integran en las etapas iniciales del proyecto (7).

Desde la perspectiva de los materiales, la literatura reciente documenta avances relevantes orientados a disminuir simultáneamente la huella de carbono y los costos. Fernando et al. realizaron una evaluación de ciclo de vida y análisis de costos de hormigones alcalino-activados con ceniza volante y cascarilla de arroz, mostrando reducciones sustanciales de la huella de carbono respecto al hormigón convencional, junto con ventajas económicas en escenarios de largo plazo (1). Pulido-Arcas et al. evaluaron morteros de revestimiento con cal hidráulica y perlita expandida, obteniendo reducciones muy significativas en conductividad térmica y una huella de carbono considerablemente inferior a la de morteros estándar, manteniendo costos compatibles con contextos de vivienda social (8). Zhao y Li exploraron materiales cementicios de escoria alcalino-activada con polvo de vidrio, evidenciando su potencial como alternativa de bajo carbono y bajo costo al cemento Portland tradicional (9). Estos desarrollos se sustentan teóricamente en el marco del análisis del ciclo de vida y en los principios de la economía circular aplicados a los materiales de construcción (1,6,7).

En lo relativo a los sistemas estructurales, Li et al. aplicaron una evaluación holística de ciclo de vida para cuantificar la huella de carbono de escaleras prefabricadas de hormigón, identificando la etapa de producción de materiales como el principal generador de emisiones y proponiendo indicadores normalizados que facilitan la comparación entre alternativas (10). En un trabajo posterior, Li et al., extendieron este enfoque a placas compuestas prefabricadas, concluyendo que la prefabricación puede reducir las emisiones en la etapa de materialización de los edificios respecto a los métodos tradicionales in situ (11). Laitinen et al. compararon marcos de madera y de hormigón en edificios residenciales de varios pisos en Finlandia, encontrando que las estructuras de madera maciza alcanzan efectos climáticos positivos con incrementos de costo inferiores a los asociados a soluciones de hormigón cuando se consideran los sistemas adicionales de protección frente al fuego y la intemperie (12). Por su parte, Mata-Falcón et al., demostraron que las losas nervadas de hormigón diseñadas digitalmente permiten reducir el volumen de material, las emisiones asociadas y los costes constructivos en comparación con las losas macizas convencionales (13).

La fase operacional de los edificios es igualmente determinante en el costo de la huella de carbono. Darshan et al. realizaron una auditoría energética detallada en un edificio residencial y propusieron medidas de eficiencia energética que redujeron de forma simultánea el costo de la energía y las emisiones de CO₂. (2) Usman y Abdullah desarrollaron un modelo analítico para evaluar el consumo energético y la huella de carbono operacional en función de las características del edificio, proporcionando indicadores cuantificables para apoyar la toma de decisiones (14). Marzouk et al., evaluaron alternativas de sistemas de climatización e iluminación durante la etapa de diseño mediante un enfoque multicriterio apoyado en modelos de información de edificios, incorporando criterios de ahorro en costes operativos, consumo energético y emisiones de carbono (15). Taheri et al., demostraron, mediante la implementación real de un control predictivo basado en la nube para sistemas HVAC en edificios educativos, que es posible reducir

de manera significativa el consumo energético y la huella de carbono con inversiones relativamente moderadas en automatización (16). William et al., revisaron soluciones de envolvente edilicia orientadas a edificios de energía casi nula, identificando combinaciones de aislamiento, acristalamiento y protección solar que minimizan tanto la demanda energética como la huella de carbono y el costo asociado (17). Lo et al., por su parte, exploraron la integración de estrategias de vehículo-edificio y fuentes renovables para la gestión inteligente de la energía en edificios de energía casi nula, evidenciando reducciones adicionales en las emisiones y los costos de operación (18).

El retrofitting de edificios existentes constituye otro frente de investigación central para disminuir el costo de la huella de carbono en el parque edificado. Schwartz et al., compararon estrategias de rehabilitación frente a demolición y nueva construcción en el contexto residencial de Londres, mostrando que la rehabilitación profunda puede ofrecer ventajas en huella de carbono total y costo del ciclo de vida en la mayoría de los escenarios analizados (19). Luo y Oyedele desarrollaron un modelo de optimización del ciclo de vida de intervenciones de retrofitting que incorpora los efectos del cambio climático sobre el desempeño energético de los edificios, identificando soluciones que equilibran la reducción de emisiones y los costos bajo distintos horizontes temporales (20). Saffari et al., evaluaron técnica y económicamente un sistema híbrido de bomba de calor como medida de mejora en el parque residencial, demostrando su viabilidad para reducir la huella de carbono operacional y los costos de calefacción (21). Kertsmik et al. analizaron estrategias de renovación óptimas en costo, en emisiones de CO₂ equivalente y en energía total, concluyendo que las divergencias entre estas funciones objetivo son significativas y que una sola métrica de optimización resulta insuficiente para respaldar decisiones sostenibles (22). Ropo et al., incorporaron las emisiones de CO₂ incorporado y el costo de compensación de carbono en la optimización del ciclo de vida de sistemas energéticos en edificios de carbono neutro, evidenciando que ignorar estos términos conduce a subestimar el costo real de la descarbonización (23).

Los instrumentos de modelado y apoyo a la decisión han adquirido un papel estratégico en este campo. Gan desarrolló un modelo de diseño generativo automatizado basado en BIM para la construcción industrializada, demostrando que la optimización paramétrica de la geometría de los edificios puede reducir tanto los costos de construcción como la huella de carbono asociada (24). Hemanth Kumar y Padala presentaron un modelo de optimización multiobjetivo integrado en BIM para la gestión de la construcción sostenible, que en un caso de estudio comercial logró reducir la energía incorporada en aproximadamente un 30 % y el costo en alrededor de un 21 % (25). Schwartz et al. propusieron una herramienta de apoyo a la decisión que integra diseño generativo, optimización y evaluación del desempeño del ciclo de vida desde etapas conceptuales del proyecto (26). Cheng et al., formularon un modelo de optimización del costo total del ciclo de vida basado en la huella de carbono para un edificio modular abierto, utilizando BIM y algoritmos heurísticos para minimizar de forma simultánea los costos de construcción, la huella de carbono y los costos de disposición de residuos dentro de un marco de economía circular (27). Kiss y Szalay analizaron la sensibilidad de la huella de carbono de edificios frente a la descarbonización progresiva del mix eléctrico, mostrando que las decisiones de diseño deben anticipar la evolución futura de la intensidad de carbono de la red para evitar soluciones que hoy parecen óptimas pero

pierden eficiencia climática en escenarios de alta penetración renovable (28). Yang et al. integraron la electrificación de edificios con recursos energéticos distribuidos y estrategias avanzadas de gestión de energía, evidenciando que el control dinámico y predictivo permite reducir de manera simultánea las emisiones y los costos operativos (29). Finalmente, Seyedabadi et al. mostraron que la elección adecuada de vegetación en cubiertas verdes contribuye a la secuestación de carbono y a la reducción de la huella de carbono del edificio, añadiendo una dimensión biofísica relevante a los modelos de costo de la huella (30).

En síntesis, la literatura reciente pone de manifiesto que el costo de la huella de carbono en la construcción y funcionamiento de los edificios depende de un entramado complejo de decisiones sobre materiales, sistemas estructurales, estrategias de operación, intervenciones de retrofitting y esquemas de gestión energética, que deben analizarse de forma integrada desde la perspectiva del ciclo de vida (1–3,6,7,14,19–23). En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar el estado del arte sobre el costo de la huella de carbono en la construcción y el funcionamiento de los edificios, a partir de la literatura científica indexada en Scopus para el periodo 2021–2025, apoyándose en el análisis bibliométrico realizado mediante VOSviewer (3,4). La pregunta de investigación que orienta el estudio es: ¿qué estrategias de diseño, selección de materiales, sistemas constructivos y gestión operacional permiten minimizar el costo de la huella de carbono en la construcción y el funcionamiento de los edificios, según la evidencia científica disponible entre 2021 y 2025?

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación adopta un enfoque de tipo mixto con predominio cuantitativo, integrado por una fase analítica de carácter cualitativo. En consecuencia, el estudio se estructuró en dos etapas: una dimensión heurística o exploratoria, seguida de una fase hermenéutica de carácter analítico e interpretativo (31).

Para ejecutar la primera fase, se realizó el 01 de marzo de 2025 una búsqueda en la base de datos Scopus, utilizando la ruta: TITLE-ABS-KEY ("carbon footprint") AND TITLE-ABS-KEY (Cost) AND TITLE-ABS-KEY (Buildings).

La estrategia de búsqueda se diseñó para capturar publicaciones que abordaran explícitamente la relación entre la huella de carbono y los costos en el contexto de los edificios. La inclusión del campo TITLE-ABS-KEY garantiza que los términos seleccionados estén presentes en el título, el resumen o las palabras clave de los documentos, lo que aumenta la probabilidad de recuperar trabajos cuyo foco principal sea la interacción entre costo y huella de carbono, y no solo menciones tangenciales.

El término "carbon footprint" se eligió por ser el descriptor más extendido en la literatura para referirse a las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al ciclo de vida, mientras que "cost" permite incorporar tanto el costo económico directo como el costo asociado a estrategias de mitigación. La inclusión de "buildings" restringe el universo de documentos al ámbito edilicio, evitando la incorporación de estudios centrados en infraestructuras, transporte u otros sectores cuya lógica de análisis difiere de la de los edificios. Esta combinación de términos equilibra

amplitud y especificidad, permitiendo identificar un corpus manejable pero representativo del estado del arte.

Como criterio de inclusión se consideraron únicamente los artículos revisados por pares, publicados entre 2021 y 2025. Esta decisión responde a tres razones principales: i) garantizar la comparabilidad y el estándar mínimo de calidad metodológica asociado a la revisión por pares, ii) reducir la heterogeneidad en los procesos de selección y validación de contribuciones propias de actas de congresos y literatura no seriada, y iii) evitar la doble contabilización de resultados que suelen publicarse primero en congresos y posteriormente en artículos de revista ampliados. La focalización en artículos indexados permite, además, disponer de metadatos completos (afiliaciones, citas, palabras clave normalizadas) necesarios para el análisis bibliométrico y la construcción de mapas de co-ocurrencia.

Con los resultados obtenidos, se aplicó la segunda fase, correspondiente al análisis bibliométrico, en el que se utilizaron las opciones de análisis que brindan el software libre VOSviewer (4) y Scopus (3), identificando autores, países, revistas, afiliaciones, áreas temáticas e interpretando clústeres temáticos.

Para construir el mapa de coocurrencia de palabras clave, se utilizó el método de conteo completo (Full counting) de las palabras que aparecen en los títulos y resúmenes de los artículos analizados. Con la finalidad de lograr relevancia semántica, se consideró un umbral de ocurrencia mínima de 10 veces por término. Esto permitió que, de los 15261 términos extraídos, 396 cumplieran con el criterio de frecuencia. Luego, tomando en cuenta las recomendaciones de los autores del software libre VOSviewer, se consideró el 60% de los términos con mayor índice de relevancia, obteniendo 238 términos, con los cuales se construyó la red, mediante normalización por fuerza de asociación (4).

RESULTADOS

La búsqueda bibliográfica identificó 482 artículos publicados en el periodo 2021-2025. Como ilustra la Figura 1, la producción científica muestra un crecimiento sostenido.

**COSTO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EDIFICIOS:
EVIDENCIA RECIENTE SOBRE MATERIALES, RETROFITTING Y GESTIÓN ENERGÉTICA (2021-2025)**

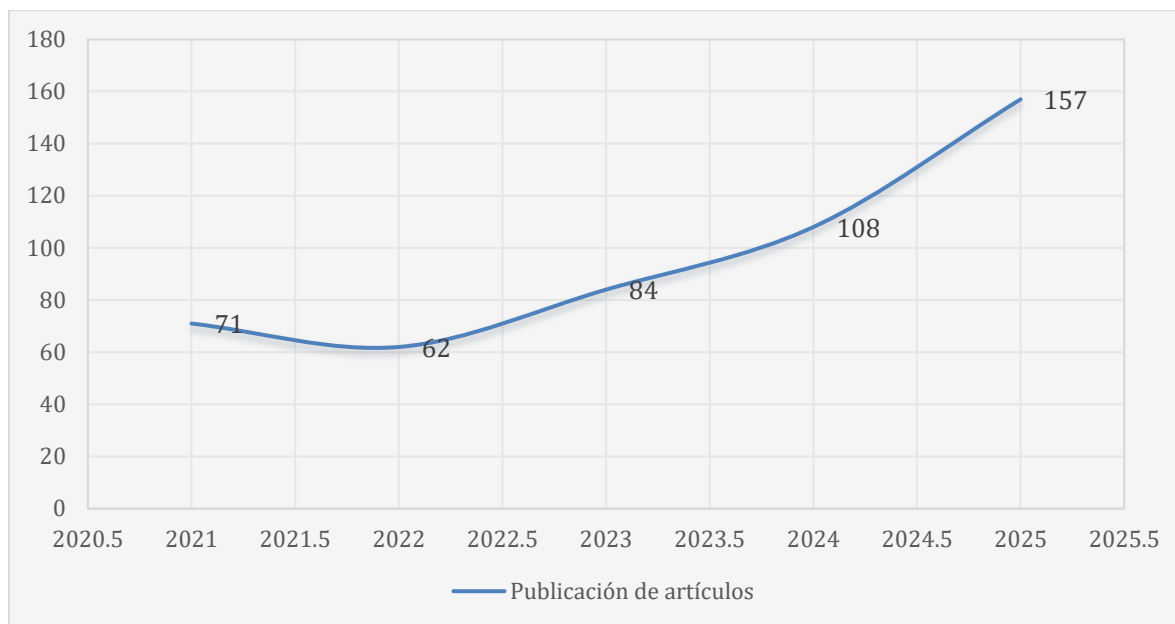


Figura 1. Artículos publicados por año.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

Por su parte, la Tabla 1 sintetiza los indicadores generales del corpus: se registraron 2078 autores pertenecientes a 106 países y distribuidos en 250 fuentes. En términos de impacto, la muestra acumula 7565 citas, con un promedio de 15.70 citas por publicación y 3.64 por autor.

Tabla 1. Datos generales.

DATOS	RESULTADOS
Número de publicaciones	482
Número de autores	2078
Número de países	106
Número de citas	7565
Número de fuentes	250
Promedio de citas/publicación	15.70
Promedio de citas/autores	3.64

Nota: Elaboración propia utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

Por otra parte, la Figura 2 identifica a Hanafy, A.A., Kaewunruen, S. y William, M.A. como los autores con mayor producción, con cuatro artículos cada uno.

**COSTO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EDIFICIOS:
EVIDENCIA RECIENTE SOBRE MATERIALES, RETROFITTING Y GESTIÓN ENERGÉTICA (2021-2025)**

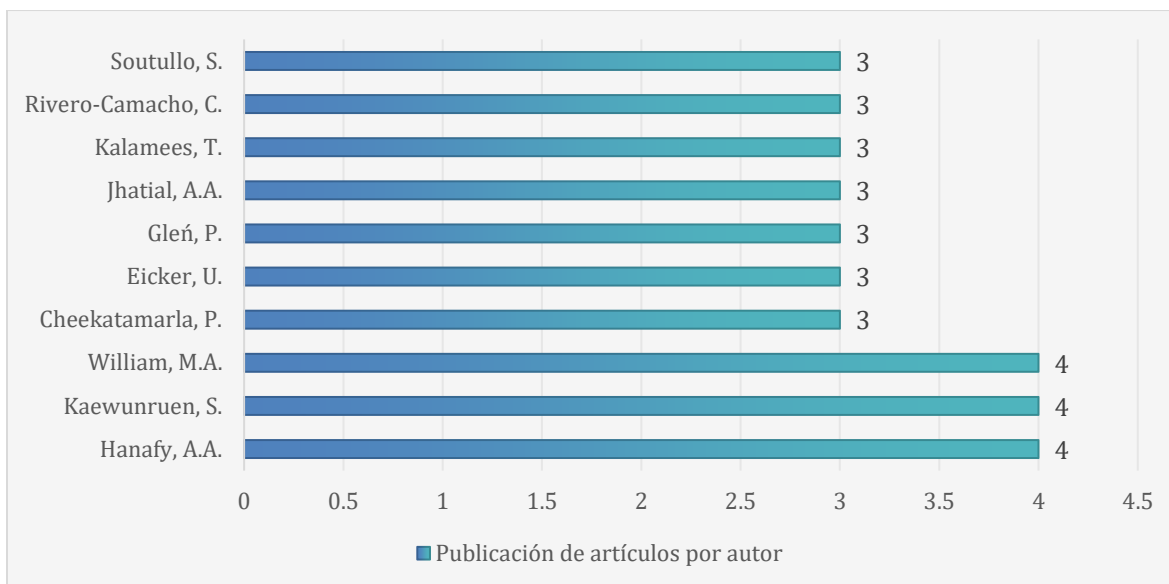


Figura 2. Top 10 de los autores con mayor número de artículos publicados.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

En cuanto a la distribución geográfica de las publicaciones (Figura 3), China encabeza la productividad científica con 77 documentos, seguida por Estados Unidos con 60 y el Reino Unido con 50.

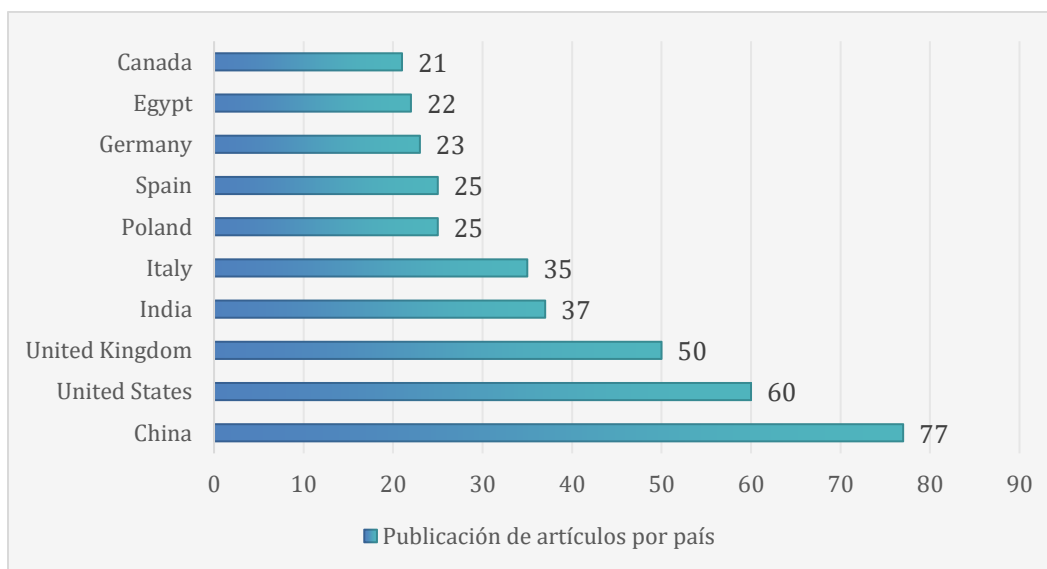


Figura 3. Top 10 de los países con mayor número de artículos publicados.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

**COSTO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EDIFICIOS:
EVIDENCIA RECIENTE SOBRE MATERIALES, RETROFITTING Y GESTIÓN ENERGÉTICA (2021-2025)**

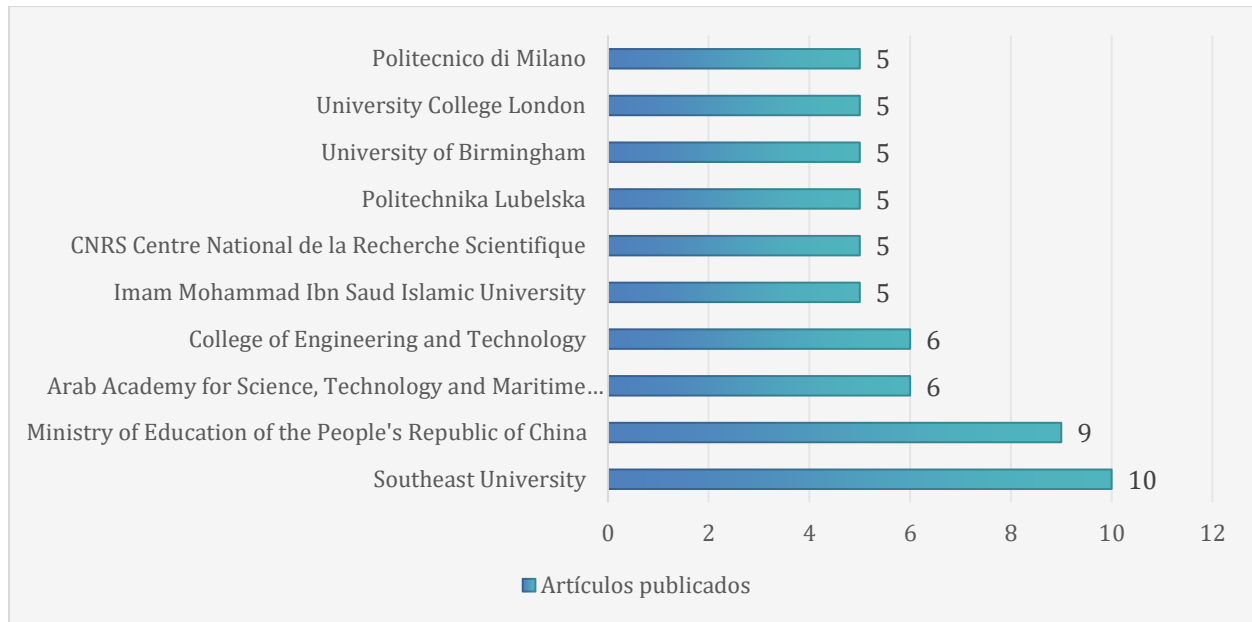


Figura 4. Top 10 de las afiliaciones con mayor número de artículos publicados.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

Con respecto a la afiliación de las publicaciones, en la Figura 4 se observa que Southeast University con 10 publicaciones lidera la lista, seguida por el Ministry of Education of the People's Republic of China con 9.

En relación con el número de publicaciones por fuente, en la Figura 5 se puede observar que Energies lidera la lista con 23 artículos publicados.

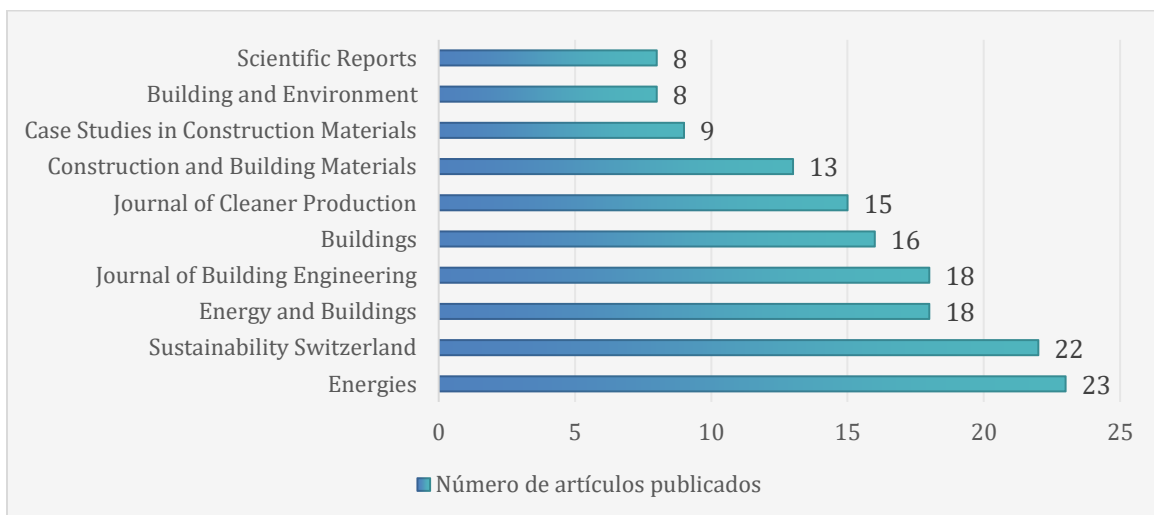


Figura 5. Top 10 de las fuentes con mayor número de artículos publicados.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

Asimismo, el documento con mayor cantidad de citas, específicamente con 209 citas, es el elaborado por Nabila Shehata, Enas Taha Sayed y Mohammad Ali Abdelkareem, con el título “Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review”, publicado en el año 2021 en la revista Science of The Total Environment, volumen 762.

En la Figura 6 se aprecia que la National Natural Science Foundation of China es la institución patrocinadora con el mayor número de artículos publicados.

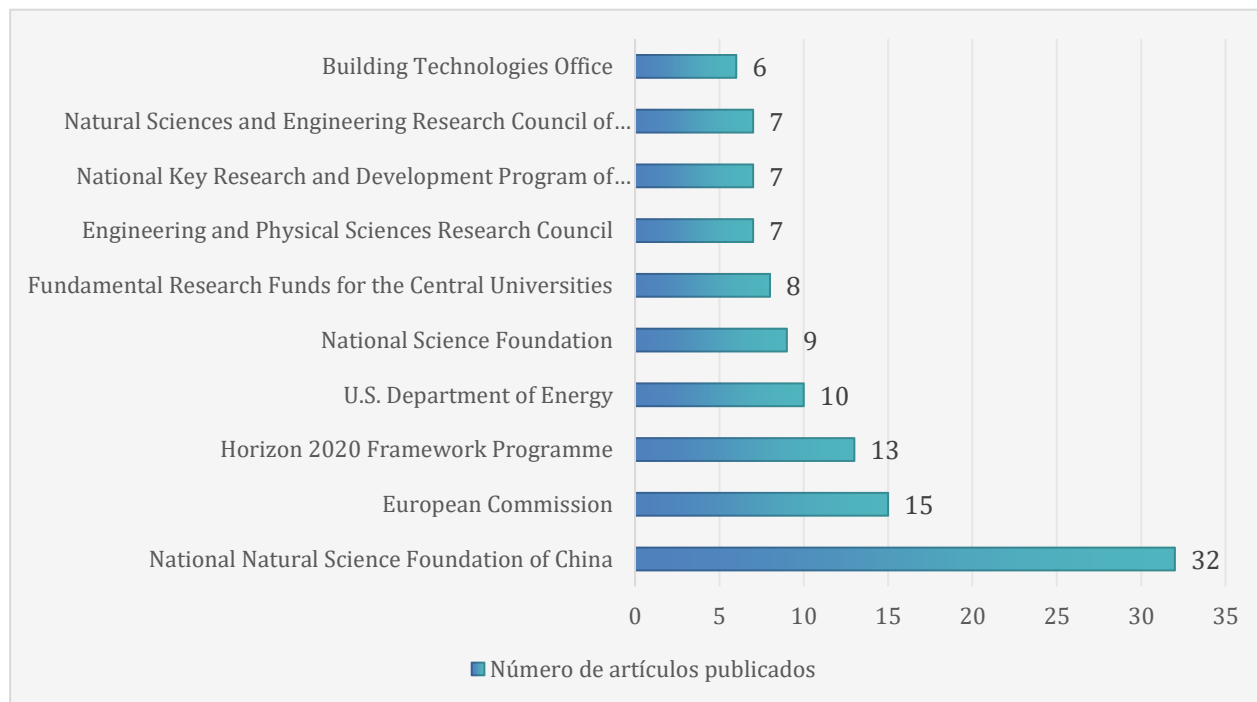


Figura 6. Top 10 de los patrocinadores con mayor número de artículos publicados.

Nota: La figura se elaboró utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

En la Figura 7 se aprecia que el 26% de las publicaciones se clasifican dentro del área temática de la ingeniería, seguido de un 15% correspondiente al área temática de la energía y otro 15% del área de las ciencias ambientales.

En la Figura 8 se presenta el mapa de co-ocurrencia de palabras clave (título y resumen) elaborado utilizando VOSviewer, en el cual se observa la interconexión de los temas de investigación dentro de la literatura bibliométrica. Cada uno de los nodos representa las palabras clave. Asimismo, el tamaño de cada nodo muestra la frecuencia con la que un término aparece en el conjunto de datos. Las líneas que unen a los nodos representan la fuerza de la co-ocurrencia entre los términos. En este sentido, los clústeres de colores agrupan los términos que se utilizan con frecuencia juntos, lo que genera los principales subcampos temáticos de la investigación.

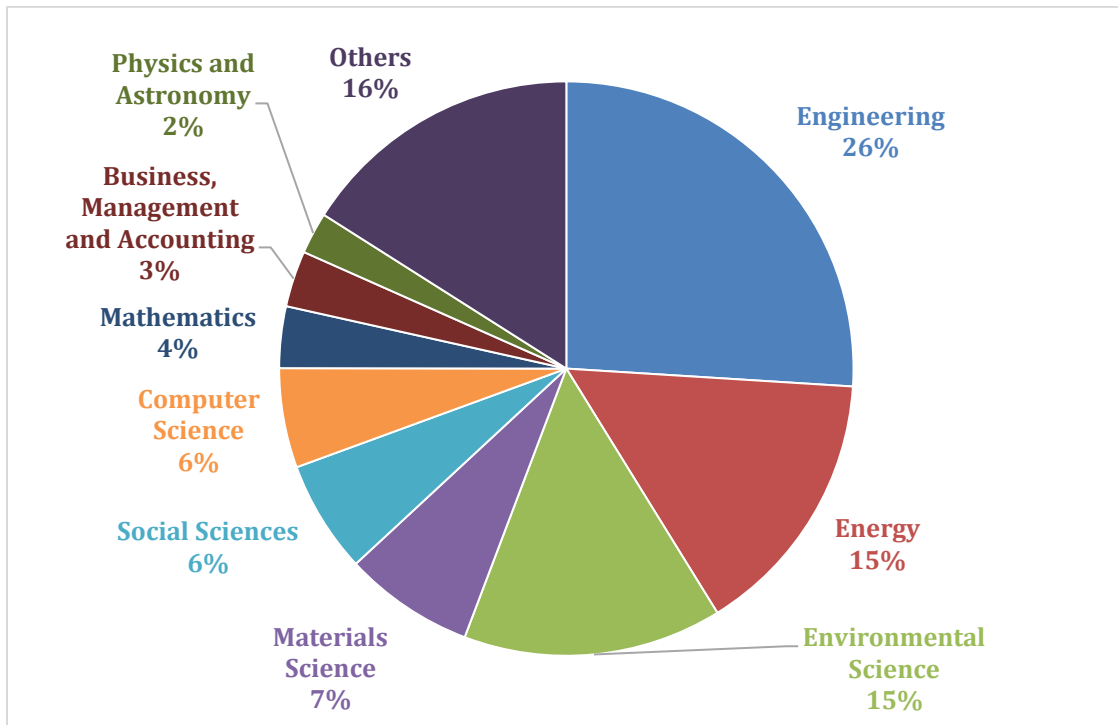


Figura 7. Área temática de los artículos publicados.

Nota: Elaboración propia utilizando las herramientas de análisis de Scopus.

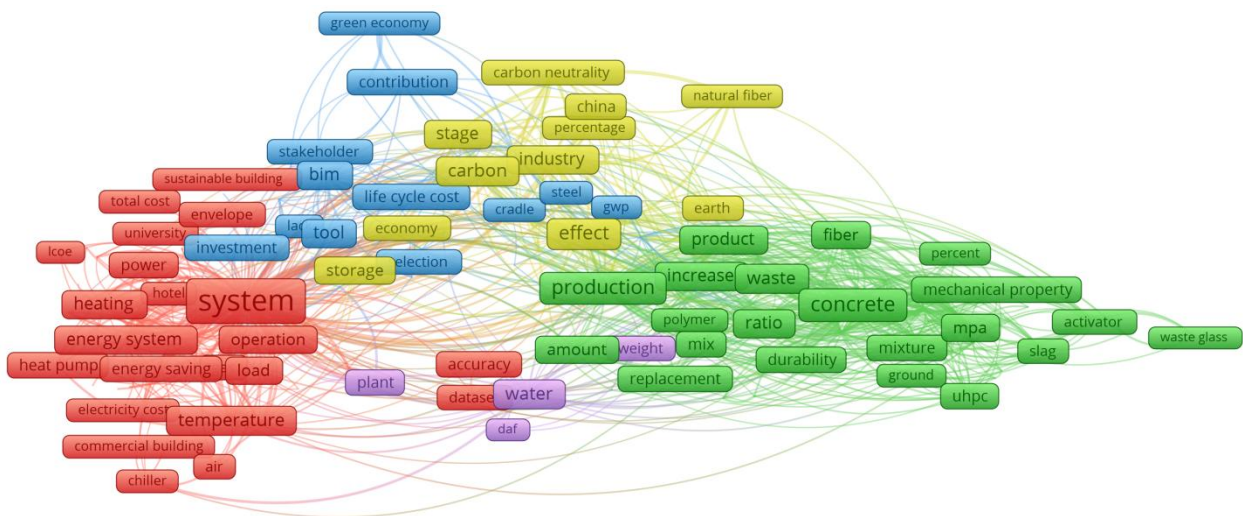


Figura 8. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave elaborado en base al título y el resumen de los artículos.

Nota: Elaboración propia utilizando VOSviewer.

Los colores de cada clúster permiten identificar cinco subcampos temáticos de investigación. El clúster rojo con términos como system, chiller, air, commercial building, temperature, window,

load, energy saving, heat pump, energy efficiency, hotel, heating, residential building, total cost, sustainable building, envelope, accuracy, dataset, se identifica como “sistemas energéticos en edificios”.

El clúster azul agrupa los términos: green economy, contribution, stakeholder, lcc, bio, bim, software, Europe, investment, tool, sustainable material, selection, cradle, steel, gwp, present study, green roof. Por lo tanto, se lo identifica como: “evaluación económico-ambiental y herramientas BIM/LCC”. El clúster amarillo con los términos storage, economy, carbon, stage, industry, effect, earth, china, percentage, carbon neutrality, natural fiber, ccs, permite identificar este clúster como: “transición industrial baja en carbono y economía del carbono”.

El clúster verde al agrupar los términos concrete, product, fiber, percent, production, increase, waste, mortar, amount, mix, replacement, durability, ratio, property, mixture, ground, uhpc, metakaolin, slag, mpcc, activator, waste glass, mechanical property, se lo identifica como: “materiales cementicios y concretos de baja huella”. Finalmente, el clúster púrpura al agrupar los términos daf, water, plant, weight, se lo identifica como: “procesos de tratamiento y manejo de recursos hídricos”.

DISCUSIÓN

La tendencia ascendente en el número de artículos publicados, países, fuentes y citas confirma que el costo de la huella de carbono en la construcción y operación de edificios se ha consolidado como un campo de investigación maduro, coherente con la creciente atención señalada por Myint y Shafique en torno al carbono incorporado y operacional. El hallazgo de cinco clústeres temáticos (sistemas energéticos en edificios, evaluación económico-ambiental con herramientas BIM/LCC, transición industrial baja en carbono, materiales cementicios de baja huella y procesos hídricos) dialoga directamente con los ejes identificados por Joensuu et al. (LCA en economía circular) y Jalaei et al. (especificación de materiales de bajo carbono en la contratación pública). En conjunto, el mapa de co-ocurrencias muestra que la literatura ha pasado de análisis parciales a aproximaciones integradas que combinan el desempeño energético, los costos y las emisiones a lo largo del ciclo de vida (1–3,6,7).

Los resultados sobre la centralidad de los sistemas de climatización, las bombas de calor y las envolventes en los clústeres rojos y verdes refuerzan los planteamientos de Darshan et al., William et al. y Taheri et al., quienes demostraron que las estrategias de eficiencia energética en HVAC y envolvente permiten reducciones simultáneas de consumo y emisiones con costos asumibles (2,15–17). De forma análoga, la fuerte presencia de términos asociados a concreto, residuos, cenizas, escorias y vidrio de desecho corrobora la relevancia de la línea de investigación descrita por Fernando et al., Pulido-Arcas et al. y Zhao y Li en torno a los concretos alcalino-activados y los morteros modificados como vía para disminuir el carbono incorporado sin penalizaciones económicas severas. La importancia del clúster azul, centrado en BIM, LCC, GWP y materiales sostenibles, muestra que las propuestas metodológicas de Gan, Hemanth Kumar y Padala, y Schwartz et al., han permeado el campo, favoreciendo el uso de modelos integrados de optimización costo-carbono en la práctica profesional (24–26).

Desde una perspectiva crítica, los resultados evidencian, sin embargo, una tensión teórica persistente entre enfoques predominantemente tecnológicos (mejora de materiales, sistemas HVAC, optimización algorítmica) y enfoques estructurales que cuestionan los modelos de producción y consumo en que se inscriben esos edificios (5–7,19). La concentración temática en soluciones de alta ingeniería (UHPC, MPCC, BIM avanzado, control predictivo) puede desplazar del foco otras dimensiones clave del costo de la huella de carbono, como los patrones de uso del suelo, la densidad urbana o la justicia ambiental, que apenas aparecen en los clústeres identificados. Además, como señalan Ropo et al. y Kiss y Szalay, la mayoría de los modelos siguen simplificando la dinámica futura del mix eléctrico y los costos de compensación, lo que genera incertidumbres importantes en la evaluación de estrategias de descarbonización a largo plazo.

La contribución novedosa de este estudio radica en ofrecer una radiografía bibliométrica integrada que conecta cuantitativamente la expansión del campo con su estructura temática interna, mostrando cómo las líneas de trabajo sobre materiales de baja huella, retrofitting, sistemas energéticos y herramientas BIM/LCC se entrelazan para configurar un paradigma de optimización multicriterio costo-carbono (1–3,6,7,14–23,25–27). Esta visión permite reinterpretar los principios subyacentes de la literatura: la transición de una lógica de “eficiencia aislada” a una lógica de “suficiencia y circularidad” en el ciclo de vida de los edificios; la emergencia de la huella de carbono como “moneda” que media las decisiones de diseño; y la aparición de tensiones entre soluciones de alta tecnología y enfoques más contextuales y territoriales. Al explicitar estas tensiones y articularlas con evidencia bibliométrica, el artículo no solo describe el estado del arte, sino que propone una agenda crítica para orientar futuras investigaciones hacia modelos de edificación que integren, de manera más explícita, equidad, resiliencia y gobernanza en el análisis del costo de la huella de carbono.

CONCLUSIONES

El estudio permitió sintetizar y organizar la producción científica reciente sobre el costo de la huella de carbono en la construcción y el funcionamiento de los edificios, abordando la pregunta de investigación planteada. Los resultados muestran un campo en expansión, articulado en torno a cinco subcampos temáticos: sistemas energéticos en edificios, evaluación económico-ambiental apoyada en BIM/LCC, transición industrial baja en carbono, materiales cementicios de baja huella y procesos hídricos, que, en conjunto, evidencian que las estrategias de diseño, selección de materiales, sistemas constructivos y gestión operacional se abordan hoy desde una lógica de ciclo de vida y de optimización conjunta de costos y emisiones.

La principal contribución del artículo radica en ofrecer una visión panorámica y estructurada que conecta el crecimiento cuantitativo de la producción académica con su configuración temática interna. Esta síntesis permite comprender cómo las diferentes líneas, desde los concretos alcalino-activados y morteros modificados hasta el retrofitting y los modelos de control avanzado de HVAC, convergen en un paradigma emergente de toma de decisiones multicriterio, donde la huella de carbono se consolida como variable de diseño al mismo nivel que el desempeño energético y el costo. De este modo, el trabajo aporta insumos conceptuales y empíricos para que investigadores y tomadores de decisión identifiquen oportunidades de reducción del costo de la

huella de carbono en el entorno construido y prioricen aquellas estrategias con mayor respaldo en la evidencia disponible.

No obstante, las conclusiones deben leerse a la luz de ciertas limitaciones. El análisis se circunscribe a un periodo temporal específico y a un conjunto acotado de documentos, por lo que algunos desarrollos relevantes podrían no haber sido capturados. Asimismo, la aproximación bibliométrica permite detectar patrones y clústeres, pero no evalúa en detalle la calidad metodológica ni el impacto real de cada estudio en contextos concretos de proyecto. Estas restricciones abren una agenda de proyección clara: ampliar el horizonte de búsqueda, integrar métricas cualitativas e incorporar dimensiones aún poco exploradas como la justicia climática, la planificación urbana o los cambios de comportamiento de usuarios, que completen la comprensión del costo de la huella de carbono. Avanzar en estas direcciones permitirá evolucionar desde un enfoque predominantemente tecnológico hacia marcos más integrales de diseño y gestión de edificios bajos en carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fernando S, Gunasekara C, Law DW, Nasvi M, Setunge S, Dissanayake R. Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete. *J Environ Manage*. 2021;295:113140. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113140
2. Darshan A, Girdhar N, Bhojwani R, Rastogi K, Angalaeswari S, Natrayan L, et al. Energy Audit of a Residential Building to Reduce Energy Cost and Carbon Footprint for Sustainable Development with Renewable Energy Sources. *Adv Civ Eng*. 2022;2022:4400874. doi: 10.1155/2022/4400874
3. Scopus [base de datos en Internet]. Amsterdam: Elsevier; 2025. Búsqueda TITLE-ABS-KEY (“carbon footprint”) AND TITLE-ABS-KEY (“Cost Reduction”). Disponible en: <https://www.scopus.com>
4. van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 2010;84(2):523-38. doi: 10.1007/s11192-009-0146-3
5. Myint NN, Shafique M. Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Case Stud Constr Mater*. 2024;20:e03024. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03024
6. Joensuu T, Leino R, Heinonen J, Saari A. Developing Buildings’ Life Cycle Assessment in Circular Economy – Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustain Cities Soc*. 2022;77:103499. doi: 10.1016/j.scs.2021.103499
7. Jalaei F, Masoudi R, Guest G. A framework for specifying low-carbon construction materials in government procurement: A case study for concrete in a new building investment. *J Clean Prod*. 2022;345:131056. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131056
8. Pulido-Arcas JA, Flores-Alés V, Pérez-Fargallo A. Coating mortars with improved physical properties, economic cost, and carbon footprint. *Case Stud Constr Mater*. 2022;16:e01095. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01095
9. Zhao J, Li S. Study on processability, compressive strength, drying shrinkage and evolution mechanisms of microstructures of alkali-activated slag-glass powder cementitious material. *Constr Build Mater*. 2022;344:128196. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128196

10. Li XJ, Xie WJ, Jim CY, Feng F. Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of prefabricated concrete stairs. *J Clean Prod.* 2021;329:129621. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129621
11. Li X, Xie W, Yang T, Lin C, Jim CY. Carbon emission evaluation of prefabricated concrete composite plates during the building materialization stage. *Build Environ.* 2023;232:110045. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110045
12. Laitinen M, Ilgin HE, Karjalainen M, Saari A. Low-Carbon Emissions and Cost of Frame Structures for Wooden and Concrete Apartment Buildings: Case Study from Finland. *Buildings.* 2024;14(5):1194. doi: 10.3390/buildings14051194
13. Mata-Falcón J, Bischof P, Huber T, Anton A, Burger J, Ranaudo F, et al. Digitally fabricated ribbed concrete floor slabs: a sustainable solution for construction. *RILEM Tech Lett.* 2022;7:68-78. doi: 10.21809/rilemtechlett.2022.161
14. Usman AM, Abdullah MK. An Assessment of Building Energy Consumption Characteristics Using Analytical Energy and Carbon Footprint Assessment Model. *Green Low-Carbon Econ.* 2023;1(1):28-40. doi: 10.47852/bonviewGLCE3202545
15. Marzouk M, Abdelbasset I, Al-Gahtani K. Evaluating Building Systems Energy Performance Superiority and Inferiority Ranking. *J Environ Inform.* 2021;38(1):56-67. doi: 10.3808/jei.202000448
16. Taheri S, Amiri AJ, Razban A. Real-world implementation of a cloud-based MPC for HVAC control in educational buildings. *Energy Convers Manage.* 2024;305:118270. doi: 10.1016/j.enconman.2024.118270
17. William MA, Suárez-López MJ, Soutullo S, Hanafy AA. Building envelopes toward energy-efficient buildings: A balanced multi-approach decision making. *Int J Energy Res.* 2021;45(15):21096-113. doi: 10.1002/er.7166
18. Lo KY, Yeoh JH, Hsieh IYL. Towards Nearly Zero-Energy Buildings: Smart Energy Management of Vehicle-to-Building (V2B) Strategy and Renewable Energy Sources. *Sustain Cities Soc.* 2023;99:104941. doi: 10.1016/j.scs.2023.104941
19. Schwartz Y, Raslan R, Mumovic D. Refurbish or replace? The Life Cycle Carbon Footprint and Life Cycle Cost of Refurbished and New Residential Archetype Buildings in London. *Energy.* 2022;248:123585. doi: 10.1016/j.energy.2022.123585
20. Luo XJ, Oyedele LO. Life cycle optimisation of building retrofitting considering climate change effects. *Energy Build.* 2022;258:111830. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111830
21. Saffari M, Keogh D, De Rosa M, Finn DP. Technical and economic assessment of a hybrid heat pump system as an energy retrofit measure in a residential building. *Energy Build.* 2023;295:113256. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113256
22. Kertsmik KA, Kuusk K, Lylykangas K, Kalamees T. Evaluation of renovation strategies: cost-optimal, CO₂e optimal, or total energy optimal? *Energy Build.* 2023;287:112995. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112995
23. Ropo M, Mustonen H, Knuutila M, Luoranen M, Kosonen A. Considering embodied CO₂ emissions and carbon compensation cost in life cycle cost optimization of carbon-neutral building energy systems. *Environ Impact Assess Rev.* 2023;101:107100. doi: 10.1016/j.eiar.2023.107100
24. Gan VJL. BIM-Based Building Geometric Modeling and Automatic Generative Design for Sustainable Offsite Construction. *J Constr Eng Manag.* 2022;148(10):04022111. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002369

25. Hemanth Kumar N, Padala SPS. A BIM-integrated multi objective optimization model for sustainable building construction management. *Constr Innov.* 2025;25(6). doi: 10.1108/CI-09-2023-0223
26. Schwartz Y, Raslan R, Korolija I, Mumovic D. A decision support tool for building design: An integrated generative design, optimisation and life cycle performance approach. *Int J Archit Comput.* 2021;19(3):401-30. doi: 10.1177/14780771219998024
27. Cheng MY, Vu QT, Zhang XK. Carbon-footprint-based optimization for building life-cycle total cost analysis – A case study on MEGA house. *J Build Eng.* 2025;114:114273. doi: 10.1016/j.jobbe.2025.114273
28. Kiss B, Szalay Z. Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization: a life cycle-based multi-objective optimization approach. *Int J Life Cycle Assess.* 2023;28(7):933-52. doi: 10.1007/s11367-022-02043-y
29. Yang S, Gao HO, You F. Building electrification and carbon emissions: Integrated energy management considering the dynamics of the electricity mix and pricing. *Adv Appl Energy.* 2023;10:100141. doi: 10.1016/j.adapen.2023.100141
30. Seyedabadi MR, Eicker U, Karimi S. Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. *Environ Challenges.* 2021;4:100119. doi: 10.1016/j.envc.2021.100119
31. Avendaño, F. Animarse a la tesis. Homo Sapiens Ediciones; 2020.