



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i2.4854>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

Cost-effective decarbonization: global evidence on strategies to reduce the carbon footprint in productive sectors

Descarbonização economicamente viável: evidências globais sobre estratégias para reduzir a pegada de carbono nos setores produtivos

Wilson Eduardo Jaramillo Sangurima ^I
wjaramillosa@uide.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4058-5053>

Correspondencia: wjaramillosa@uide.edu.ec

***Recibido:** 20 de abril de 2026 ***Aceptado:** 19 de mayo de 2026 * **Publicado:** 06 de junio de 2026

I. Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), Quito, Ecuador.

Resumen

Este artículo analiza las estrategias más eficientes para reducir el costo de la huella de carbono en los sectores productivos, a partir de la pregunta sobre qué enfoques permiten conciliar descarbonización y viabilidad económica. Se aplicó una metodología en dos fases: una etapa heurística, basada en una búsqueda sistemática de 368 artículos indexados en Scopus con la ruta TITLE-ABS-KEY (“carbon footprint”) AND TITLE-ABS-KEY (“Cost Reduction”), y una etapa hermenéutica, en la que se realizó un análisis bibliométrico y de coocurrencia de términos mediante el software VOSviewer y las herramientas de análisis de la propia base de datos. Los resultados muestran un crecimiento acelerado de la producción científica desde 2020, una alta concentración de publicaciones en ingeniería, ciencias ambientales y energía, y la configuración de seis clústeres temáticos que articulan tecnologías energéticas y de captura de carbono, innovación en construcción sostenible, cadenas de suministro y vehículos eléctricos, optimización del consumo energético en microredes y centros de datos, materiales cementicios sostenibles y tratamiento de agua con enfoque de ciclo de vida. El argumento central del estudio sostiene que las estrategias costo-eficientes de reducción de la huella de carbono surgen de la combinación de innovaciones tecnológicas, capacidades organizacionales y mecanismos económicos, más que de intervenciones aisladas en un único nivel. Se concluye que el mapa temático obtenido aporta un marco integrador para orientar futuras investigaciones y decisiones de política pública y empresarial hacia una descarbonización económicamente sostenible y sectorialmente diferenciada.

Palabras clave: Huella de carbono; reducción de costos; desarrollo sostenible; política ambiental; gestión de la energía.

Abstract

This article analyzes the most efficient strategies for reducing the carbon footprint cost in productive sectors, starting with the question of which approaches allow for reconciling decarbonization and economic viability. A two-phase methodology was applied: a heuristic stage, based on a systematic search of 368 articles indexed in Scopus using the path TITLE-ABS-KEY (“carbon footprint”) AND TITLE-ABS-KEY (“Cost Reduction”), and a hermeneutic stage, in which a bibliometric and term co-occurrence analysis was performed using the VOSviewer software and the database's own analysis tools. The results show accelerated growth in scientific output since 2020, a high concentration of publications in engineering, environmental sciences, and energy, and the emergence of six thematic

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

clusters that connect energy and carbon capture technologies, innovation in sustainable construction, supply chains and electric vehicles, optimization of energy consumption in microgrids and data centers, sustainable cementitious materials, and water treatment with a life-cycle approach. The study's central argument is that cost-effective carbon footprint reduction strategies arise from a combination of technological innovations, organizational capabilities, and economic mechanisms, rather than from isolated interventions at a single level. It concludes that the resulting thematic map provides an integrative framework to guide future research and public and business policy decisions toward economically sustainable and sectorally differentiated decarbonization.

Keywords: Carbon footprint; cost reduction; sustainable development; environmental policy; energy management.

Resumo

Este artigo analisa as estratégias mais eficientes para reduzir o custo da pegada de carbono em setores produtivos, partindo da questão de quais abordagens permitem conciliar a descarbonização e a viabilidade econômica. Foi aplicada uma metodologia em duas fases: uma etapa heurística, baseada em uma busca sistemática de 368 artigos indexados no Scopus utilizando o caminho TITLE-ABS-KEY (“pegada de carbono”) AND TITLE-ABS-KEY (“Redução de Custos”), e uma etapa hermenêutica, na qual foi realizada uma análise bibliométrica e de coocorrência de termos utilizando o software VOSviewer e as ferramentas de análise da própria base de dados. Os resultados mostram um crescimento acelerado na produção científica desde 2020, uma alta concentração de publicações em engenharia, ciências ambientais e energia, e o surgimento de seis clusters temáticos que conectam tecnologias de energia e captura de carbono, inovação em construção sustentável, cadeias de suprimentos e veículos elétricos, otimização do consumo de energia em microrredes e data centers, materiais cimentícios sustentáveis e tratamento de água com uma abordagem de ciclo de vida. O argumento central do estudo é que estratégias de redução da pegada de carbono com boa relação custo-benefício resultam de uma combinação de inovações tecnológicas, capacidades organizacionais e mecanismos econômicos, e não de intervenções isoladas em um único nível. Conclui-se que o mapa temático resultante fornece uma estrutura integrativa para orientar pesquisas futuras e decisões de políticas públicas e empresariais rumo a uma descarbonização economicamente sustentável e setorialmente diferenciada.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

Palavras-chave: Pegada de carbono; redução de custos; desenvolvimento sustentável; política ambiental; gestão de energia.

Introducción

El cambio climático constituye uno de los desafíos más apremiantes de la era contemporánea. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2024), las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzaron aproximadamente 57,4 Gt CO₂e en 2022, y el presupuesto de carbono restante para mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C podría agotarse en menos de tres años al ritmo actual de emisiones. La huella de carbono, definida como la medida del total de emisiones de CO₂ directa e indirectamente causadas por una actividad o acumuladas a lo largo del ciclo de vida de un producto (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014), se ha convertido en el indicador central para evaluar el impacto ambiental de organizaciones, sectores productivos y naciones. En este contexto, la base de datos Scopus registra 368 artículos científicos indexados bajo la ruta de búsqueda TITLE-ABS-KEY ("carbon footprint") AND TITLE-ABS-KEY ("Cost Reduction"), lo que evidencia un creciente interés académico multisectorial en la intersección entre el costo económico y la reducción de emisiones de carbono (Scopus, 2025).

Los antecedentes económicos del problema revelan que la reducción de la huella de carbono no solo representa una obligación ambiental, sino también una oportunidad financiera estratégica. Wang et al. (2016) demostraron que los contratos de reducción de emisiones en cadenas de suministro, al incorporar la preferencia del mercado por productos bajos en carbono, pueden generar beneficios económicos mutuos para productores y consumidores. Caragnano et al. (2020) evidenciaron que las empresas que reducen sus emisiones de GEI disfrutaban de un menor costo de financiamiento de deuda, lo que convierte la descarbonización en una ventaja competitiva financiera. Asimismo, los mercados de carbono se consolidan como mecanismos de política que internalizan los costos externos de las emisiones: Li et al. (2019) analizaron cómo el esquema chino de Reducción Certificada de Emisiones (CER) puede generar ahorros significativos para el sistema nacional de comercio de carbono, mientras que An et al. (2021) determinaron que el costo marginal de abatimiento para las empresas manufactureras chinas no debería superar los 200 yuan/tonelada para mantener la viabilidad económica del programa. Estos hallazgos evidencian que la relación entre política climática, precio del carbono y reducción de costos es compleja y sectorial, y que los instrumentos de mercado constituyen la vía más costo-eficiente para alcanzar metas de descarbonización.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

La revisión de los sectores productivos más estudiados en la literatura confirma que la reducción del costo de la huella de carbono atraviesa múltiples industrias. En el sector energético, Parkinson et al. (2019) establecieron el costo nivelado de mitigación de CO₂ a través de distintas rutas de producción de hidrógeno, señalando el hidrógeno verde como la opción con mayor potencial de descarbonización a largo plazo. McQueen et al. (2020) complementaron este enfoque con un análisis del costo de la captura directa de aire (DAC) acoplada a energía térmica baja en carbono en Estados Unidos, concluyendo que la integración con fuentes renovables puede reducir sustancialmente el costo por tonelada de CO₂ capturada. En el transporte, Breuer et al. (2021) evaluaron estrategias para reducir emisiones de GEI en vehículos pesados mediante tecnologías eléctricas y de celdas de combustible, mientras que Islam y Lownes (2019) analizaron el momento óptimo para la transición a flotas de autobuses eléctricos considerando tanto el ahorro en costos operativos como la reducción del carbon footprint. Lander et al. (2021) cuantificaron cómo una gestión térmica eficiente de las baterías de iones de litio en vehículos eléctricos puede reducir simultáneamente el costo y la huella de carbono del ciclo de vida, y Kamath et al. (2020) exploraron el potencial económico y ambiental de las baterías de segunda vida en aplicaciones residenciales y utilitarias.

En el sector de la construcción y los materiales, la literatura revisada identifica estrategias concretas de reducción de costos vinculadas a la disminución de la huella de carbono. Elchalakani et al. (2014) demostraron que el uso de altos volúmenes de escoria granulada de alto horno (GGBFS) como sustituto del cemento Portland reduce significativamente tanto las emisiones incorporadas como los costos en proyectos de gran escala. Das et al. (2022) revisaron el potencial del concreto geopolimérico como alternativa sostenible, con reducciones de emisiones de GEI de hasta el 80% respecto al concreto convencional. N. H. K. y Padala (2025) integraron el modelado BIM con algoritmos de optimización multiobjetivo (NSGA-III) y lograron una reducción del 30% en la energía incorporada y del 21% en los costos de construcción. Kim et al. (2012) desarrollaron un modelo económico y ambiental para seleccionar el diseño óptimo de techos verdes en escuelas primarias, equilibrando la inversión inicial con los beneficios climáticos a largo plazo. Estas investigaciones convergen en la necesidad de marcos integrados de análisis ciclo de vida (LCA) y optimización multiobjetivo para identificar las soluciones con mejor balance costo-carbono.

Las teorías fundantes que enmarcan el estudio de la reducción del costo de la huella de carbono remiten a tres grandes corrientes: la economía ambiental neoclásica que justifica la internalización de externalidades mediante precios al carbono, la teoría de la economía circular que plantea la

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

reutilización de recursos para reducir emisiones y costos simultáneamente, y el LCA, que proporciona el marco metodológico para cuantificar impactos ambientales en todas las etapas de un producto o servicio.

Jain et al. (2018) propusieron un marco estratégico para medir la gestión circular de cadenas de suministro integrando métricas de carbono y rentabilidad, mientras que Bartie et al. (2021) aplicaron principios de exergía y economía circular en la cadena de valor fotovoltaica, identificando oportunidades de reducción de huella ambiental y costo. Yadav et al. (2018) cuantificaron el presupuesto energético y la huella de carbono en sistemas agrícolas de labranza cero, mostrando que las prácticas regenerativas pueden reducir tanto las emisiones como los costos de producción agrícola. Zhai y Rubin (2013) realizaron una evaluación tecno-económica de sistemas de captura de carbono poscombustión por membranas poliméricas, y Kerscher et al. (2021) analizaron la pirolisis de metano por plasma de haz de electrones como vía de producción de hidrógeno de bajo carbono con viabilidad económica documentada. Zhang et al. (2014), por su parte, formularon el problema del despacho en flujo de taller bajo tarifas eléctricas variables para minimizar simultáneamente el costo eléctrico y la huella de carbono en manufactura.

Por otro lado, Eriksson et al. (2016) señalaron que la reducción del desperdicio alimentario puede reducir la huella de carbono neta a un costo negativo, es decir, generando ahorros; Cogert et al. (2019) demostraron que la combinación de tratamientos anaerobios en plantas de aguas residuales puede disminuir tanto el costo como las emisiones de GEI en hasta 1,72 kg CO₂e/d/m³; y Subraveti et al. (2023) demostraron que implementar captura y almacenamiento de carbono (CCS) en la industria del cemento y el acero incrementa el costo de construcción de infraestructuras en apenas ~1%, mientras habilita reducciones de CO₂ del 51%. Estos hallazgos fragmentados justifican la necesidad de investigaciones que sistematicen el conocimiento disponible y propongan marcos de reducción de costos de la huella de carbono aplicables en distintos contextos sectoriales.

En base a lo expuesto, el presente artículo tiene como objetivo analizar las principales estrategias de reducción del costo de la huella de carbono documentadas en la literatura científica indexada en Scopus, con el fin de identificar patrones, vacíos y oportunidades de investigación futura. La pregunta de investigación que guía este estudio es: ¿Cuáles son las estrategias más eficientes en términos de costo para la reducción de la huella de carbono en los sectores productivos analizados en la literatura científica indexada en Scopus? La respuesta a esta pregunta contribuirá a consolidar un marco

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

analítico que oriente tanto la toma de decisiones empresariales como el diseño de políticas públicas orientadas a la descarbonización económicamente sostenible.

Metodología

Como estrategia para abordar la pregunta de investigación, se aplicaron dos fases durante el proceso de la investigación, la primera fase que consistió en una fase heurística o exploratoria y la segunda en una fase hermenéutica o analítica e interpretativa (Avendaño, 2020).

Para la ejecución de la primera fase, se realizó en febrero del año 2026, una búsqueda en la base de datos Scopus, utilizando la ruta: TITLE-ABS-KEY ("carbon footprint") AND TITLE-ABS-KEY ("Cost Reduction"). Como criterio de inclusión se consideraron los artículos revisados por pares, publicados hasta el 31 de diciembre de 2025. Con los artículos obtenidos, se ejecutó la segunda etapa, referente al análisis bibliométrico, en donde, se emplearon las opciones de análisis que brindan el software libre VOSviewer y Scopus.

Para realizar el mapa de coocurrencia de palabras claves, se empleó el método de conteo completo (Full counting) de los términos que aparecen en el texto de los títulos y resúmenes de los artículos analizados. En este sentido, con el propósito de obtener relevancia semántica, se consideró un umbral de mínima ocurrencia de 10 ocurrencias por término. Esto permitió, que de los 12312 términos extraídos, 251 cumplan con el criterio de frecuencia. Luego, tomando en cuenta las recomendaciones de los autores del software libre VOSviewer, se consideró el 60% de términos con mayor índice de relevancia, obteniendo 151 términos, con los cuales se construyó la red, mediante normalización por fuerza de asociación (van Eck y Waltman, 2010).

Resultados y discusión

Resultados

Como resultado se obtuvo 368 artículos, publicados desde el año 2008 hasta el 31 de diciembre del 2025. Como se puede observar en la Figura 1, desde el año 2008 hasta el 2019 se publicaron entre 3 y 16 artículos por año. A partir del año 2020, que coincide con la fecha de ocurrencia de la pandemia del Covid 19, se aprecia un incremento acelerado y pronunciado, llegando a publicarse 92 artículos en el año 2025.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

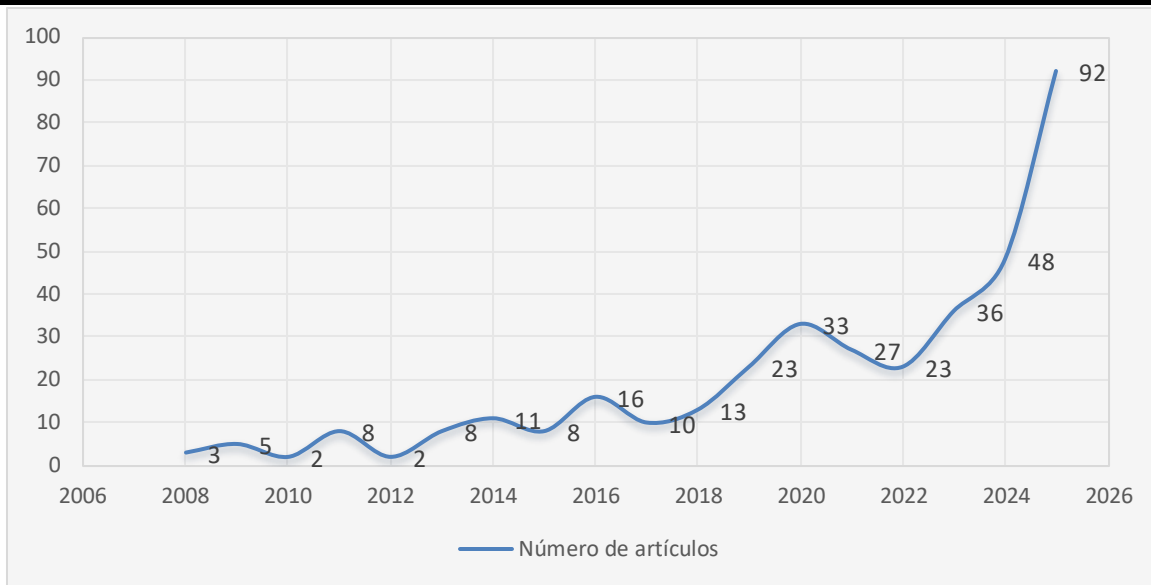


Figura 1. Artículos publicados por año (2008 - 2025)

En la Tabla 1 se aprecia que el número de autores es 1480, el origen de las publicaciones son 72 países y 190 revistas o fuentes, logrando un total de 10005 citas, dando un promedio de 27.19 citas por publicación y de 6.76 citas por autor.

Tabla 1. Datos generales

Dato	Resultados
Número de publicaciones	368
Número de autores	1480
Número de países	72
Número de citas	10005
Número de revistas	190
Promedio de citas/publicación	27.19
Promedio de citas/autores	6.76

Nota: Análisis bibliométrico propio elaborado en base a los datos extraídos de Scopus

Por otro lado, como se puede observar en la Figura 2, los autores con más publicaciones son Glén, P., Shukla, S., Struzik, W., Wrana, J., y Zhao, F., con 3 publicaciones cada uno.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

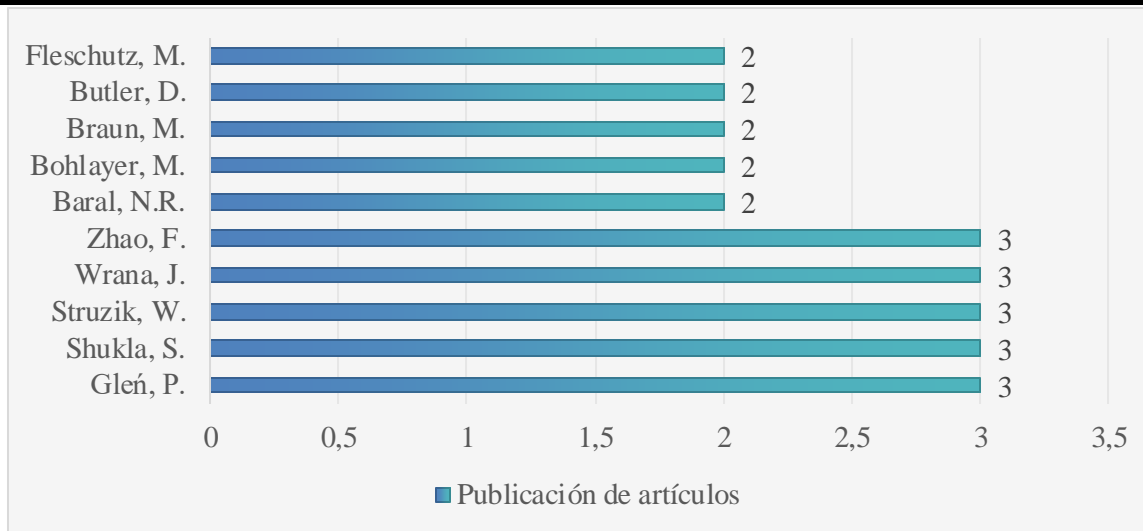


Figura 2. Autores con mayor número de publicaciones

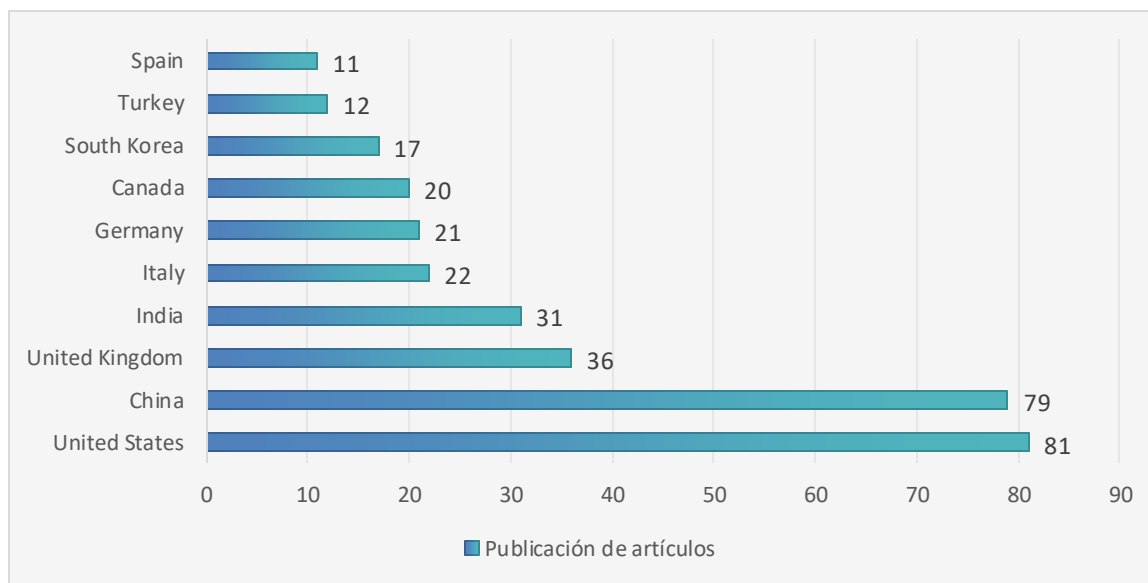


Figura 3. Top 10 de los países con mayor cantidad de publicaciones

Con respecto a los países que generan la publicación de los artículos, en la Figura 3 se puede observar que Estados Unidos lidera la lista con 81 artículos, seguido por China con 79 y Reino Unido con 36. Por otro lado, en lo concerniente a la afiliación de la publicación, en la Figura 4 se observa que Lawrence Berkeley National Laboratory lidera el número de publicaciones con siete, seguido por el Ministry of Education of the People's Republic of China y el Technische Universität München con cinco cada uno.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

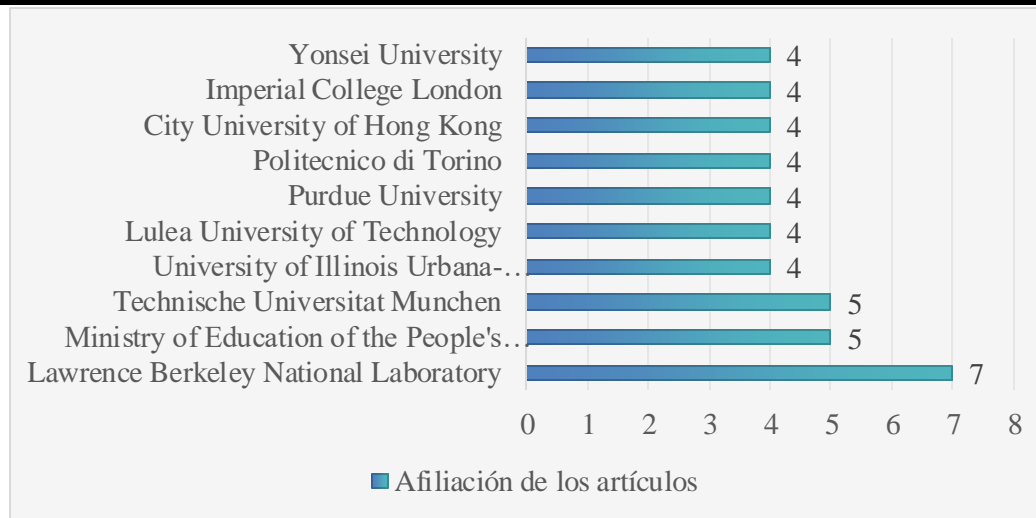


Figura 4. Top 10 de las afiliaciones con mayor número de publicaciones

En relación al número de publicación de artículos por fuente, en la Figura 5 se puede observar que Journal of Cleaner Production lidera con 21 artículos publicados, seguido por la Environmental Science and Technology con 19. Así mismo, el documento con mayor cantidad de citas es el elaborado por Parkinson, B., Balcombe, P., Speirs, J.F., Hawkes, A.D. y Hellgardt, K., con 517 citas, publicado en el año 2019 en la revista Energy and Environmental Science, volumen 12, número 1, denominado: “Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes”.

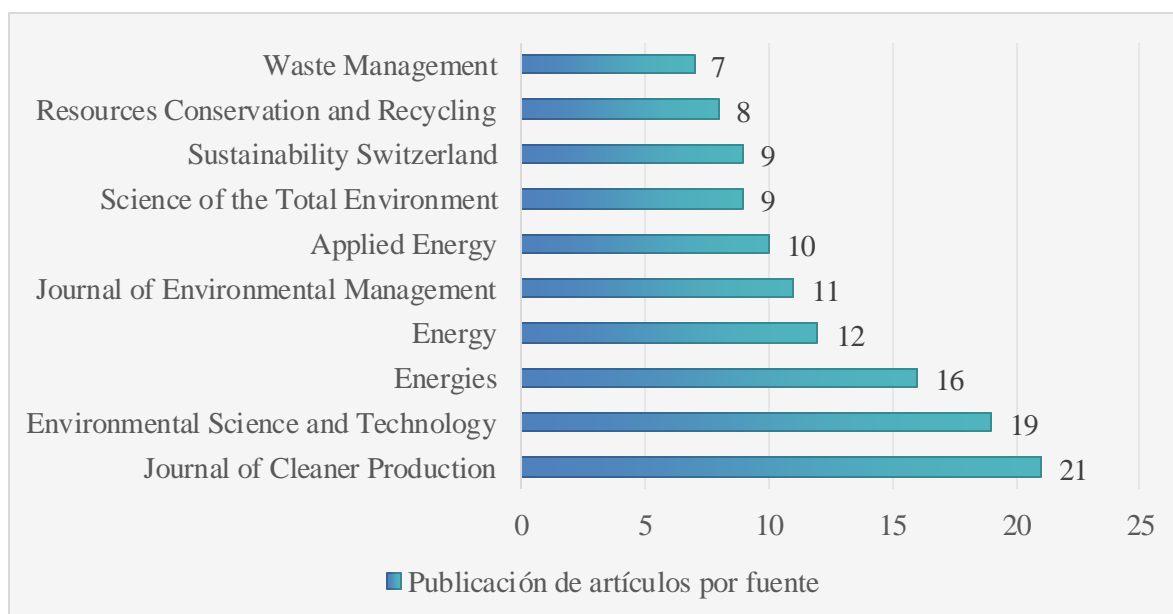


Figura 5. Top 10 de las fuentes con más publicaciones

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

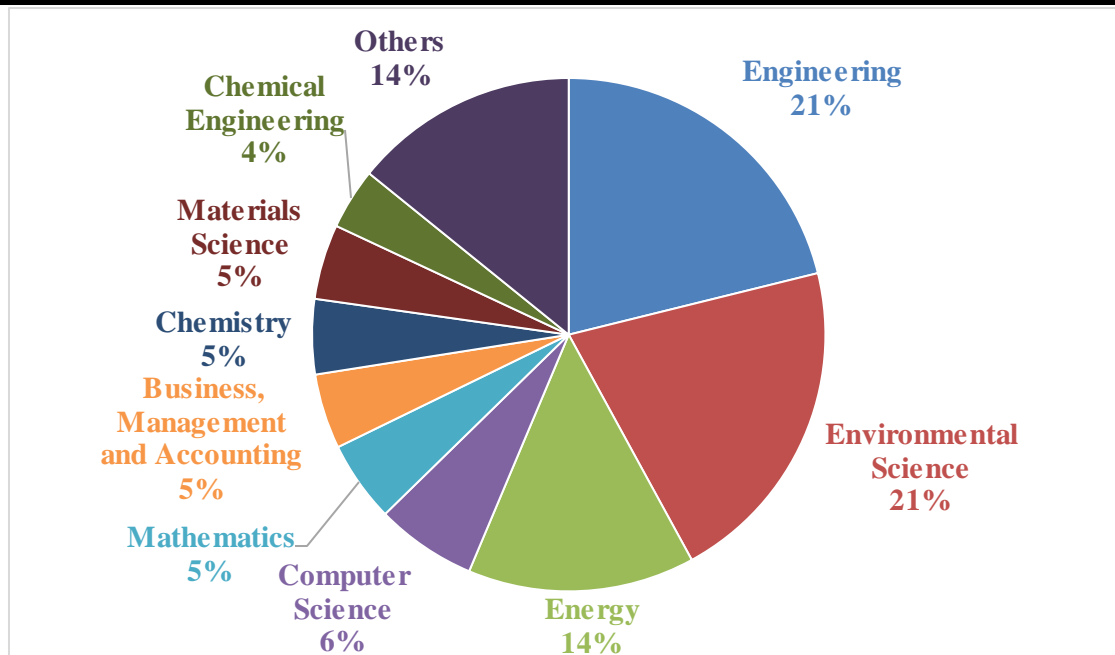


Figura 6. Área temática de las publicaciones

En la Figura 6 se aprecia que el 21% de las publicaciones se clasifican dentro del área temática de las ingenierías, seguido de otro 21% correspondiente al área temática de las ciencias ambientales y de un 14% correspondiente al área temática de las energías. Por otro lado, en la Figura 7 se observa que National Natural Science Foundation of China con 34 artículos, es la institución que más investigaciones patrocina con respecto a la temática investigada.



Figura 7. Área temática de las publicaciones

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

En lo que respecta a la estructura semántica de la investigación que se está analizando, en la Figura 8 se observa la red de co-ocurrencia de palabras claves, en donde se aprecia que los términos se agrupan por colores en forma de nodos, representando seis clústers temáticos. En este sentido, los nodos de mayor tamaño representan los términos que aparecen con más frecuencia. Por otro lado, las líneas que unen cada nodo representan la frecuencia con la cual los términos aparecen juntos en los resúmenes y títulos.

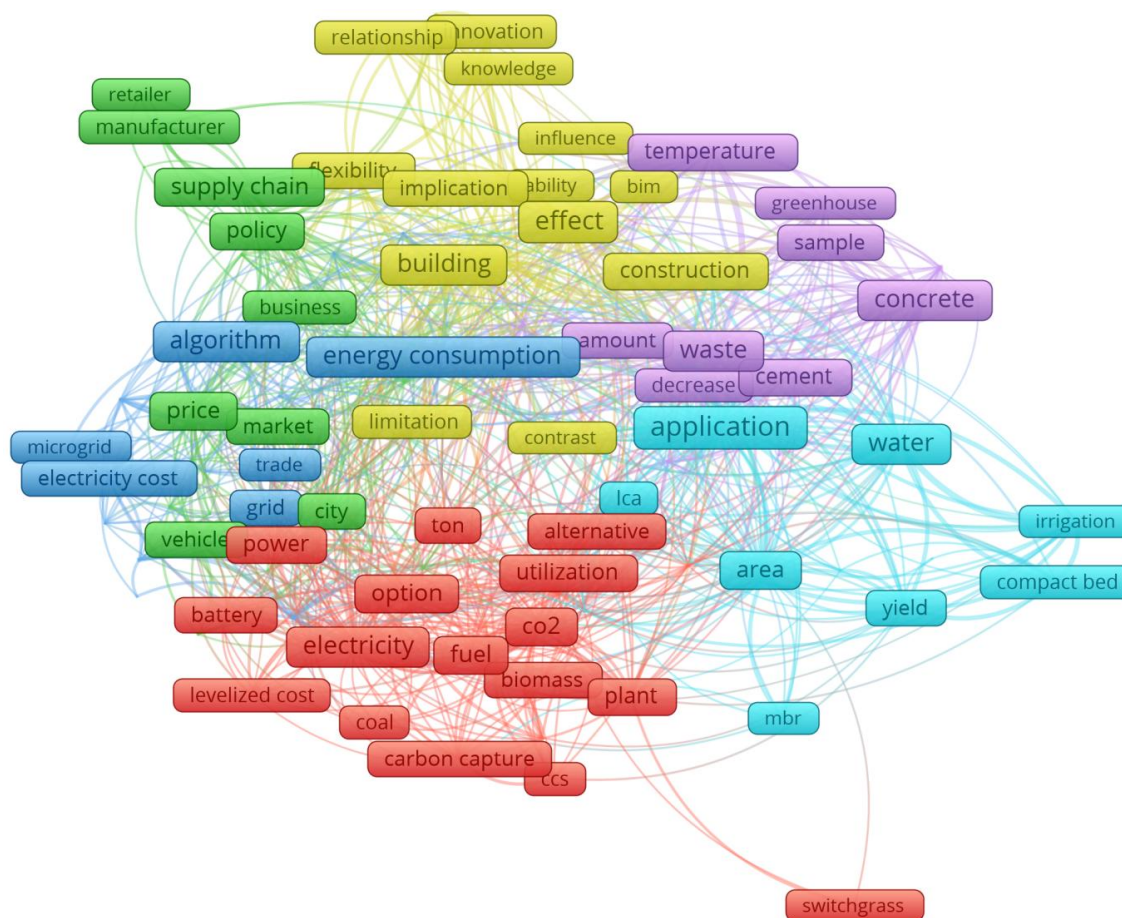


Figura 8. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave

Los términos agrupados en el clúster rojo (switchgrass, plant, ccs, carbon capture, coal, levelized cost, electricity, fuel, biomass, CO₂, region, option, power, ton, alternative, integration), permiten identificar el clúster como: “Tecnologías energéticas y captura de carbono para la descarbonización del mix eléctrico”.

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

Con los términos observados en el clúster de color amarillo (contrast, limitation, importance, construction, building, effect, bim, implication, ability, flexibility, influence, knowledge, relationship, innovation, firm), se identifica este clúster como: “Innovación y capacidades organizacionales en construcción sostenible basada en BIM”.

De la agrupación de términos en el clúster verde (retailer, manufacturer, vendor, supply chain, emission reduction, company, business, price, market, electric vehicle, vehicle, bev), emerge la temática de la “Gestión de la cadena de suministro y vehículos eléctricos para la reducción de emisiones”.

De los términos agrupados en el clúster de color azul (power consumption, device, electricity cost, microgrid, datacenter, simulation, effectiveness, energy consumption, algorithm, technique, problem, operating costs, energy cost), se identifica el clúster como: “Optimización algorítmica del consumo energético en microgrids y centros de datos”.

Los términos observados en el clúster de color púrpura (addition, cement, waste, amount, product, temperature, greenhouse, sample, compressive strength, sample, concrete), permite identificarlo como “Materiales cementicios sostenibles: uso de residuos, desempeño mecánico y huella de carbono”.

Finalmente, los términos agrupados en el clúster cian (mbr, yield, compact bed, irrigation, water, application, lca), permiten identificar la temática de este clúster como: “Aplicaciones de tratamiento de agua y análisis de ciclo de vida en sistemas MBR e irrigación”.

Discusión

Esta discusión se centra en cómo los patrones bibliométricos y los seis clústeres temáticos identificados profundizan y matizan las relaciones entre costo y huella de carbono descritas en la introducción. En conjunto, los resultados confirman la tesis de que la descarbonización se ha desplazado desde un enfoque puramente ambiental hacia una lógica de optimización económica multisectorial, en línea con las evidencias de Wang et al. (2016), Caragnano et al. (2020) y Li et al. (2019), pero también revelan tensiones y vacíos que estos autores apenas esbozan.

En primer lugar, el crecimiento exponencial de publicaciones a partir de 2020 y la concentración de artículos en áreas de ingeniería, ciencias ambientales y energía refuerzan la relevancia económica de la descarbonización planteada en la introducción. La alta citación del trabajo de Parkinson et al. (2019) sobre el costo nivelado de mitigación de CO₂ mediante hidrógeno y de McQueen et al. (2020)

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

sobre captura directa de aire se refleja en el clúster rojo, donde convergen términos como carbon capture, ccs, coal, levelized cost y biomass, articulando un campo robusto de análisis tecno-económico de tecnologías energéticas y de captura. Esta asociación confirma que, como sugieren Zhai y Rubin (2013) y Kerscher et al. (2021), la discusión actual ya no se limita a la viabilidad técnica, sino al costo marginal de abatimiento y su comparación entre rutas tecnológicas. No obstante, el predominio de contextos de países desarrollados dentro de este clúster proyecta una agenda de investigación aún insuficientemente adaptada a las condiciones de financiamiento y riesgo de economías emergentes.

En segundo lugar, el clúster amarillo sobre “Innovación y capacidades organizacionales en construcción sostenible basada en BIM” dialoga directamente con los hallazgos de N. H. K. y Padala (2025), Kim et al. (2012) y Das et al. (2022), quienes documentan reducciones simultáneas de emisiones y costos mediante soluciones de diseño y materiales innovadores. Los términos effect, bim, knowledge, innovation y firm muestran que la literatura reconoce cada vez más el papel de las capacidades dinámicas de las empresas (aprendizaje organizacional, flexibilidad y adopción tecnológica) como condición para capturar los beneficios económicos de la construcción baja en carbono. Sin embargo, el mapa semántico sugiere que estos trabajos siguen fragmentados por tipo de tecnología (escoria granulada de alto horno molida (GGBFS), geopolímeros, techos verdes), sin un marco unificado que articule cómo las capacidades organizacionales se traducen en curvas de costo de abatimiento diferenciadas entre empresas y regiones.

El clúster verde, centrado en “Gestión de la cadena de suministro y vehículos eléctricos para la reducción de emisiones”, amplía las conclusiones de Wang et al. (2016), Jain et al. (2018), Breuer et al. (2021), Islam y Lownes (2019) y Kamath et al. (2020), integrando en un mismo espacio semántico los conceptos de supply chain, emission reduction, price, market y electric vehicle. Esta convergencia confirma que las estrategias de reducción del costo de la huella de carbono se desplazan hacia modelos de negocio y configuraciones logísticas, por ejemplo, el uso compartido de vehículos, la planificación de rutas y la circularidad de baterías, más que a intervenciones aisladas sobre procesos individuales. Al mismo tiempo, las tensiones entre objetivos ambientales y económicos se hacen visibles: los términos vinculados a precio y mercado revelan que muchas decisiones de inversión en tecnologías bajas en carbono dependen de incentivos externos (subsidios, precios al carbono), ratificando la importancia de los esquemas de reducción certificada de emisiones (CER) y de comercio de emisiones discutidos por Li et al. (2019) y An et al. (2021).

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

Por su parte, el clúster azul sobre “Optimización algorítmica del consumo energético en microgrids y centros de datos” y el clúster cian relativo a “Aplicaciones de tratamiento de agua y análisis de ciclo de vida en sistemas MBR (biorreactor de membrana) e irrigación” muestran la expansión de la agenda más allá de los sectores tradicionales de energía y construcción. Los términos *algorithm*, *simulation*, *datacenter*, *energy cost* evidencian que las tecnologías digitales y los modelos de optimización ya operan como instrumentos de reducción de costos y huella de carbono en infraestructuras altamente intensivas en energía, coherentemente con los enfoques de gestión energética y control inteligente discutidos en la literatura revisada.

En el ámbito del agua, la presencia conjunta de MBR, *application* y LCA (análisis de ciclo de vida) sugiere un alineamiento con estudios como los de Cogert et al. (2019), que demuestran reducciones conjuntas de costo y emisiones en tratamiento de aguas residuales, y con la lógica de análisis de ciclo de vida enfatizada en la introducción. Sin embargo, ambos clústeres siguen relativamente desconectados del discurso de mercados de carbono y políticas de precios, lo cual indica una brecha entre las innovaciones a nivel de proceso y los instrumentos económicos a nivel de sistema.

Finalmente, el clúster púrpura sobre “Materiales cementicios sostenibles: uso de residuos, desempeño mecánico y huella de carbono” complementa el panorama al poner en diálogo las contribuciones de Elchalakani et al. (2014) y Das et al. (2022) con líneas de trabajo emergentes en reciclaje de residuos y optimización mecánica. La coocurrencia de *waste*, *cement*, *compressive strength* y *greenhouse* indica que la literatura avanza hacia diseños de materiales que internalizan simultáneamente requisitos estructurales, ambientales y de costo, lo que refuerza el argumento de que las soluciones costo-eficientes de abatimiento dependen de enfoques integrados de LCA y desempeño estructural.

Desde un plano crítico, los resultados revelan una tensión persistente entre tres principios: (a) la lógica de eficiencia marginal de la economía ambiental neoclásica, centrada en el costo marginal de abatimiento y los precios al carbono; (b) la lógica de circularidad, que privilegia flujos cerrados de materiales y energías; y (c) la lógica de optimización algorítmica y digital, que trata la descarbonización como un problema de control y asignación de recursos.

La contribución novedosa de este estudio reside en articular estas tres lógicas dentro de un marco bibliométrico que conecta sectores tradicionalmente analizados por separado, como, energía, construcción, cadenas de suministro, TIC (tecnologías de la información y la comunicación) y gestión del agua, en función de su potencial para lograr reducciones de huella de carbono con impactos económicos medibles. Al mostrar que las estrategias de reducción del costo de la huella de carbono

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

forman una red interconectada de decisiones tecnológicas, organizacionales y de política pública, los resultados invitan a superar enfoques sectoriales aislados y a diseñar intervenciones integradas que combinen innovación tecnológica, capacidades empresariales y mecanismos económicos para acelerar una descarbonización financieramente sostenible.

Conclusiones

Las conclusiones derivadas del análisis bibliométrico muestran que la relación entre reducción del costo y disminución de la huella de carbono constituye hoy un campo de investigación consolidado y en acelerada expansión, concentrado en las áreas de ingeniería, ciencias ambientales y energía. El crecimiento sostenido del número de artículos, autores, países y revistas, así como la configuración de seis clústeres temáticos bien diferenciados, evidencia la maduración de una agenda científica que aborda la descarbonización desde una perspectiva simultáneamente tecnológica, económica y organizacional.

En relación con el objetivo planteado, el estudio identifica y caracteriza las principales estrategias de reducción del costo de la huella de carbono documentadas en la literatura reciente, abordando a la pregunta de investigación al mostrar que las soluciones más eficientes combinan innovaciones tecnológicas (captura y uso de carbono, hidrógeno de bajo carbono, materiales cementicios avanzados, sistemas MBR), herramientas de optimización (algoritmos para microredes y centros de datos, modelos de programación y control), y mecanismos económicos (mercados de carbono, contratos en cadenas de suministro, esquemas de financiamiento verde). Los resultados indican que las estrategias costo-eficientes no se limitan a un sector específico, sino que emergen de la articulación entre energía, construcción, logística, tecnologías de la información y gestión del agua.

La principal contribución del estudio consiste en integrar, mediante un enfoque bibliométrico apoyado en redes de coocurrencia, tres planos analíticos que suelen abordarse de forma aislada: el de la economía ambiental (costos marginales de abatimiento y precios al carbono), el de la economía circular (reutilización de materiales y residuos con beneficios económicos) y el de la optimización digital (modelos algorítmicos para gestionar el consumo energético). Este marco permite reinterpretar la reducción del costo de la huella de carbono no solo como un problema de selección tecnológica, sino como el resultado de capacidades organizacionales, instrumentos de política y decisiones de diseño de sistemas. De esta manera, el estudio aporta una visión sistémica que puede servir de base

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

tanto para la toma de decisiones empresariales como para el diseño de políticas públicas de descarbonización económicamente viable.

No obstante, el trabajo presenta limitaciones que deben reconocerse. En primer lugar, el análisis se circunscribe a una única base de datos y a una estrategia de búsqueda específica, por lo que algunos aportes relevantes contenidos en otras fuentes o formulados con terminología distinta pueden no haber sido capturados. En segundo término, la naturaleza bibliométrica del enfoque privilegia indicadores cuantitativos (número de publicaciones, citas, co-ocurrencias) y no permite evaluar en profundidad la calidad metodológica, la robustez empírica ni la transferibilidad de los resultados de cada estudio. Finalmente, la interpretación de los clústeres temáticos se basa en lectura e inferencia conceptual, de modo que puede estar sujeta a cierto grado de subjetividad.

A partir de estos hallazgos, se proyectan varias líneas de trabajo futuro. Resulta necesario desarrollar estudios comparativos que integren análisis de costo del ciclo de vida, medición detallada de huella de carbono y evaluación de instrumentos económicos en contextos de economías emergentes, donde las restricciones financieras y regulatorias difieren de los países que hoy dominan la producción científica. Asimismo, se recomienda avanzar hacia modelos integrados que conecten decisiones micro (diseño de materiales, operación de sistemas energéticos, logística) con marcos macro de política climática y de financiamiento sostenible. Por último, el mapa de investigación obtenido sugiere la oportunidad de profundizar en enfoques interdisciplinarios que combinen ingeniería, economía, gestión y ciencias sociales para comprender mejor las barreras organizacionales y sociales que todavía limitan la adopción de estrategias costo-eficientes de descarbonización.

Referencias

1. An, Y., Zhou, D., Yu, J., Shi, X., & Wang, Q. (2021). Carbon emission reduction characteristics for China's manufacturing firms: Implications for formulating carbon policies. *Journal of Environmental Management*, 284, 112055. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112055>
2. Avendaño, F. (2020). *Animarse a la tesis*. Homo Sapiens Ediciones.
3. Bartie, N. J., Cobos-Becerra, Y. L., Fröhling, M., Schlatmann, R., & Reuter, M. A. (2021). The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105516. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105516>

Descarbonización costo-efectiva: evidencia global sobre estrategias para reducir la huella de carbono en sectores productivos

4. Breuer, J. L., Samsun, R. C., Stolten, D., & Peters, R. (2021). How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. *Environment International*, 152, 106474. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106474>
5. Caragnano, A., Mariani, M., Pizzutilo, F., & Zito, M. (2020). Is it worth reducing GHG emissions? Exploring the effect on the cost of debt financing. *Journal of Environmental Management*, 270, 110860. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110860>
6. Cogert, K. I., Ziels, R. M., & Winkler, M. K. H. (2019). Reducing cost and environmental impact of wastewater treatment with denitrifying methanotrophs, anammox, and mainstream anaerobic treatment. *Environmental Science and Technology*, 53(21), 12935–12944. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04764>
7. Das, S., Saha, P., Prajna Jena, S., & Panda, P. (2022). Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review. *Materials Today: Proceedings*, 60, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.588>
8. Elchalakani, M., Aly, T., & Abu-Aisheh, E. (2014). Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2013.11.001>
9. Eriksson, M., Strid, I., & Hansson, P.-A. (2016). Food waste reduction in supermarkets – Net costs and benefits of reduced storage temperature. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.022>
10. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance arising from the Kyoto Protocol. IPCC.
11. Islam, A., & Lownes, N. (2019). When to go electric? A parallel bus fleet replacement study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.007>
12. Jain, S., Jain, N. K., & Metri, B. (2018). Strategic framework towards measuring a circular supply chain management. *Benchmarking*, 25(8), 3238–3252. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2017-0304>
13. Kamath, D., Shukla, S., Arsenault, R., Kim, H. C., & Anctil, A. (2020). Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications. *Waste Management*, 113, 497–507.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.034>

14. Kerscher, F., Stary, A., Gleis, S., Ulrich, A., Klein, H., & Spliethoff, H. (2021). Low-carbon hydrogen production via electron beam plasma methane pyrolysis: Techno-economic analysis and carbon footprint assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(38), 19897–19912. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.114>
15. Kim, J., Hong, T., & Koo, C.-W. (2012). Economic and environmental evaluation model for selecting the optimum design of green roof systems in elementary schools. *Environmental Science and Technology*, 46(15), 8475–8483. <https://doi.org/10.1021/es2043855>
16. Lander, L., Kallitsis, E., Hales, A., Edge, J. S., Korre, A., & Offer, G. (2021). Cost and carbon footprint reduction of electric vehicle lithium-ion batteries through efficient thermal management. *Applied Energy*, 289, 116737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116737>
17. Li, L., Ye, F., Li, Y., & Chang, C.-T. (2019). How will the Chinese Certified Emission Reduction scheme save cost for the national carbon trading system? *Journal of Environmental Management*, 244, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.100>
18. McQueen, N., Psarras, P., Pilorgé, H., Liguori, S., He, J., Yuan, M., Woodall, C. M., Kian, K., Pierpoint, L., Jurewicz, J., Lucas, J. M., Jacobson, R., Deich, N., & Wilcox, J. (2020). Cost analysis of direct air capture and sequestration coupled to low-carbon thermal energy in the United States. *Environmental Science and Technology*, 54(12), 7542–7551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00476>
19. N. H. K., & Padala, S. P. S. (2025). A BIM-integrated multi objective optimization model for sustainable building construction management. *Construction Innovation*, 25(6). <https://doi.org/10.1108/CI-09-2023-0223>
20. Parkinson, B., Balcombe, P., Speirs, J. F., Hawkes, A. D., & Hellgardt, K. (2019). Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes. *Energy and Environmental Science*, 12(1), 19–40. <https://doi.org/10.1039/c8ee02079e>
21. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2024). Informe sobre la brecha de emisiones 2024. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>
22. Scopus. (2025). Elsevier. <https://www.scopus.com>
23. Subraveti, S. G., Rodríguez Angel, E., Ramírez, A., & Roussanaly, S. (2023). Is carbon capture and storage (CCS) really so expensive? An analysis of cascading costs and CO₂

- emissions reduction of industrial CCS implementation on the construction of a bridge. *Environmental Science and Technology*, 57(6), 2595–2601.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05724>
24. Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
25. Wang, Q., Zhao, D., & He, L. (2016). Contracting emission reduction for supply chains considering market low-carbon preference. *Journal of Cleaner Production*, 120, 72–84.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.049>
26. Yadav, G. S., Das, A., Lal, R., Babu, S., Meena, R. S., Saha, P., Singh, R., & Datta, M. (2018). Energy budget and carbon footprint in a no-till and mulch based rice–mustard cropping system. *Journal of Cleaner Production*, 191, 144–157.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.173>
27. Zhai, H., & Rubin, E. S. (2013). Techno-economic assessment of polymer membrane systems for postcombustion carbon capture at coal-fired power plants. *Environmental Science and Technology*, 47(6), 3006–3014. <https://doi.org/10.1021/es3050604>
28. Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland, J. W. (2014). Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63(1), 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.011>