

Reducción de la huella de carbono en materiales y construcción de edificios industrializados

Reducing the carbon footprint in materials and industrialized building construction

Jesús D. Márquez Montejó¹   Romel J. Gallardo Amaya¹ 

¹Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación GIGMA, Ocaña, Colombia.

¿Cómo citar?

Márquez JD, Gallardo RJ. Reducción de la huella de carbono en materiales y construcción de edificios industrializados. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-20815244.

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.15244>

Recibido: 16/09/25

Revisado: 24/10/25

Aceptado: 6/11/25

Online: 9/12/25

Correspondencia

jdmarquezm@ufpso.edu.co

Resumen

Introducción. El crecimiento de la edificación y la adopción de sistemas industrializados aumentan el consumo de materiales y el carbono incorporado en los módulos de materiales (A1-A3), transporte (A4) y construcción (A5) de un análisis de ciclo de vida (ACV). Este artículo identifica tendencias y parámetros, cuantifica el potencial de calentamiento global a 100 años (GWP100) de A1-A5 en un edificio representativo y prioriza estrategias de mitigación.

Objetivo. El objetivo de esta investigación es establecer estrategias de reducción de la huella de carbono identificando tendencias y parámetros de investigación en un arquetipo de edificio industrializado dentro del contexto colombiano.

Metodología. Se realiza un análisis bibliométrico en Scopus para entender tendencias recientes y parámetros influyentes en la reducción del carbono incorporado en edificios industrializados. Luego, se cuantifica el GWP100 en A1-A5 con el arquetipo, usando el software One Click LCA (LCA: Life Cycle Assessment). Finalmente, se identifica y se prioriza las estrategias de mitigación.

Resultados. El edificio industrializado alcanzó 140,51 kg CO₂e/m² en A1-A5. El escenario mejorado (cemento con menor clinker, acero reciclado, transporte optimizado y electrificación de equipos) bajo el impacto a 85,57 kg CO₂e/m², una reducción del 39,10 %. Las estrategias más efectivas se asociaron a la selección de materiales sostenibles.

Conclusiones. Las decisiones tempranas de especificación como cementos con mayor sustitución de clinker, acero 100% chatarra y declaraciones ambientales de producto (EPD: Environmental Product Declaration) verificables, junto con selección de rutas cortas de transporte y la electrificación de equipos, representan las estrategias con mejor reducción del

Palabras clave: Huella de carbono, Calentamiento global, Desarrollo sostenible, Materiales de construcción, Industria de la Construcción.

Abstract

Introduction. The growth of construction and the adoption of industrialized systems increase the consumption of materials and the carbon embodied in the material (A1-A3), transport (A4), and construction (A5) modules of a life cycle assessment (LCA). This article identifies trends and parameters, quantifies the 100-year global warming potential (GWP100) of A1-A5 in a representative building, and prioritizes mitigation strategies.

Objective. This research aims to establish carbon footprint reduction strategies by identifying trends and research parameters in an industrialized building archetype within the Colombian context.

Methodology. A bibliometric analysis is performed in Scopus to understand recent trends and influential parameters in reducing embodied carbon in industrialized buildings. Next, GWP100 is quantified in A1-A5 with the archetype, using One Click LCA (LCA: Life Cycle Assessment) software. Finally, mitigation strategies are identified and prioritized.

Results. The industrialized building reached 140.51 kg CO₂e/m² in A1-A5. The improved scenario (cement with less clinker, recycled steel, optimized transportation, and equipment electrification) reduced the impact to 85.57 kg CO₂e/m², a reduction of 39.10%. The most effective strategies were associated with the selection of sustainable materials.

Conclusions. Early specification decisions, such as cements with higher clinker substitution, 100% scrap steel, and verifiable Environmental Product Declarations (EPDs), together with the selection of short transport routes and equipment electrification, represent the strategies with the most significant impact reduction.

Keywords: Carbon footprint, Global warming, Sustainable development, Construction materials, Construction industry.



¿Por qué se realizó este estudio?

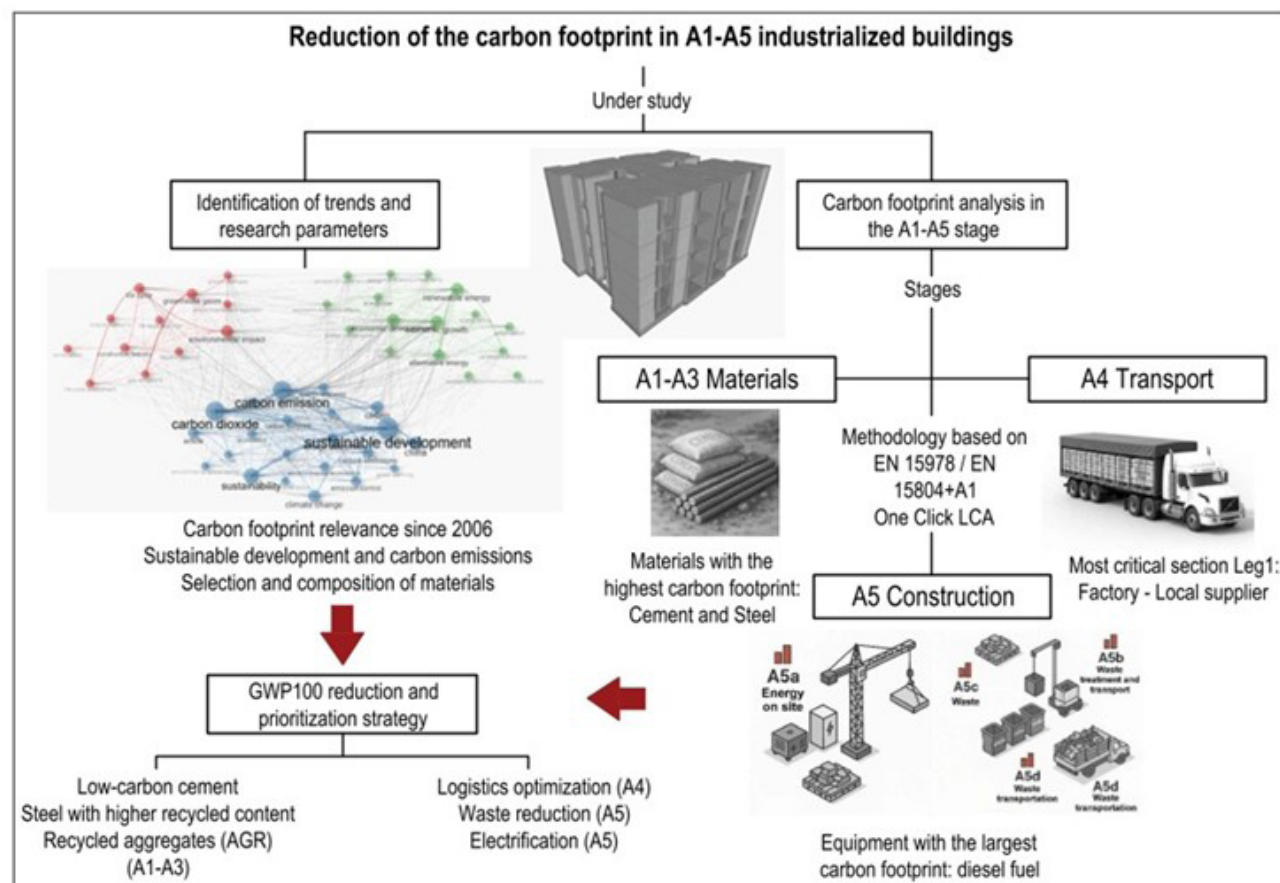
Este estudio se realizó con el objetivo de establecer estrategias para reducir la huella de carbono de los edificios industrializados mediante el análisis de un arquetipo representativo del contexto colombiano. El estudio identificó tendencias y parámetros importantes, a la vez que cuantificó el impacto del PCG100 en las etapas de materiales y construcción (A1-A5), lo que permitió priorizar las estrategias de mitigación.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

El edificio industrializado tuvo una huella de carbono total de 140,51 kg de CO₂e/m² construido en las etapas A1-A5. El cemento fue el material con mayor contribución (72,64%), seguido del acero de refuerzo (19,22%). El transporte y la construcción en obra contribuyeron menos, pero aun así tuvieron un impacto significativo. Mediante la implementación de mejoras como la sustitución parcial del clínker por escoria, el uso de acero reciclado, la optimización del transporte y la electrificación de equipos, la huella se redujo en un 39,10%, alcanzando los 85,57 kg de CO₂e/m².

¿Qué aportan estos hallazgos?

Estos resultados resaltan la importancia de tomar decisiones tempranas en el proyecto para seleccionar materiales con menor impacto, así como optimizar la logística y los procesos de construcción para reducir la huella de carbono. El estudio confirma que el enfoque debe centrarse en las etapas de producción (A1-A3), sin descuidar el transporte y la construcción (A4-A5). La metodología y el modelo propuesto ofrecen una herramienta útil para orientar las políticas y prácticas de construcción sostenible en el contexto colombiano.



Introducción

El sector de la construcción es una de las más relevantes a nivel mundial y una de las más contaminantes. Se estima que contribuye con casi el 40% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) (1) y que, según el Parlamento Europeo, consume alrededor del 36% de la energía total. Una parte considerable de estas emisiones está asociada a la extracción intensiva de materias primas y a los procesos de transporte y fabricación, que requieren hasta 2 toneladas por metro cuadrado de superficie construida (2).

El hormigón es el material de construcción más utilizado en el planeta, y la producción de cemento representa entre el 5% y el 8% de las emisiones globales de CO₂ (3). Se consumen aproximadamente 1.600 millones de toneladas de cemento anualmente (4), y su producción libera, de media, 0,56 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento (5). Esto convierte a la industria del cemento en una de las más intensivas en carbono, con impactos que superan a los de otros sectores manufactureros, según indica el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

A lo largo de su ciclo de vida los edificios representan una parte significativa de las emisiones globales de GEI (6). Tradicionalmente, la mayoría de los esfuerzos de mitigación se han centrado en reducir las emisiones operativas (calefacción, refrigeración, iluminación), representando históricamente casi el 75% del total, según un informe del PNUMA. A medida que las emisiones operativas disminuyen debido a mejoras de eficiencia y descarbonización de la red, la proporción relativa de carbono incorporado en el ciclo de vida del edificio aumenta y puede igualar o incluso superar las emisiones operativas en edificios de alto rendimiento (7). Paralelamente, varios estudios estiman que los materiales y la construcción ya contribuyen con alrededor del 11% de las emisiones totales del sector de la construcción a escala global (8).

Las emisiones de CO₂ en los edificios se dividen en dos categorías: incorporadas (diseño, producción y construcción) y operativas (uso) (9). Mientras que el segundo muestra una tendencia a la baja, el primero requiere mayor atención debido al retraso en las estrategias de mitigación (6). En particular, materiales como el cemento, el acero y el aluminio representan la mayor parte del carbono incorporado (3).

Los principales materiales estructurales utilizados en edificios de gran altura son el hormigón armado y el acero estructural. Más del 99% de las estructuras de edificios altos están actualmente construidas con estos dos materiales (10). Dado que concentran la mayor parte del carbono incorporado, la adopción de enfoques industrializados o modulares de construcción ha surgido como una vía de mitigación, con reducciones medias reportadas del 15–20% en comparación con los métodos tradicionales (11).

La Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) se ha convertido en una herramienta clave para evaluar los impactos ambientales en edificios, especialmente cuando se aplica bajo normas reconocidas como la EN 15978, que define los módulos de evaluación desde la producción hasta las fases de uso y final de vida. En este sentido, Al-Obaidy et al. (12) demostraron mediante un estudio paramétrico utilizando el software One Click LCA que comparar diferentes sistemas de construcción (hormigón, acero e híbrido) permite identificar diferencias sustanciales en el potencial de calentamiento global

y otros indicadores de impacto. Su trabajo confirma la utilidad de la EN 15978 para estandarizar evaluaciones y apoyar la toma de decisiones hacia soluciones constructivas de menor impacto.

En el análisis del ciclo de vida de los edificios, la etapa inicial del producto (A1–A3)—incluyendo la extracción de materias primas (A1), el transporte a la planta (A2) y los procesos de fabricación (A3)—representa la principal fuente de emisiones de carbono incorporadas, representando más del 70% del total en la mayoría de los casos (13,14). El Módulo A4, relacionado con el transporte de materiales a la obra, muestra una contribución secundaria, aunque es sensible a la distancia de viaje, el tipo de vehículo y la eficiencia logística (15). Mientras tanto, el Módulo A5, que incluye actividades de ensamblaje, consumo energético in situ y generación de residuos, puede alcanzar niveles de impacto significativos en contextos de baja eficiencia constructiva o control limitado de residuos, subrayando la necesidad de optimizar tanto la cadena de suministro como los procesos de instalación (16,17).

En Colombia, el sector de la construcción representa una fuente significativa de impacto ambiental debido a su alto consumo de recursos naturales y a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Según el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), los edificios representan alrededor del 7% de las emisiones totales de GEI del país, cifras que podrían aumentar entre el 12% y el 16% si se excluyen los sectores agrícola y forestal. Según Rivera García, en su investigación sobre carbono incorporado, estudios recientes han demostrado que el carbono incorporado en los edificios de viviendas sociales (VIS y VIP) en Bogotá oscila entre 158 y 231 kg CO₂eq/m², siendo las etapas producto (A1–A3) y construcción (A4–A5) los contribuyentes más significativos, representando el 81,6% y 9,6% respectivamente. En este contexto, las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044 establecen los principios y el marco metodológico para la Evaluación del Ciclo de Vida (ACL). Esta herramienta reconocida evalúa de forma exhaustiva los flujos de materiales, energía y emisiones a lo largo del ciclo de vida de un edificio.

En consecuencia, este estudio pretende determinar estrategias para reducir el carbono incorporado en las etapas A1–A5 de edificios industrializados cuantificando la huella mediante un modelo representativo utilizando el software LCA One Click y comparando escenarios de materiales y procesos dentro del contexto colombiano.

Metodología

El diseño de investigación puede clasificarse como mixto con un enfoque descriptivo, ya que incluye un componente cualitativo para identificar los parámetros y estrategias asociados a la reducción de la huella de carbono en edificios industrializados. Posteriormente, se incorpora un componente cuantitativo para evaluar la huella de carbono utilizando Declaraciones de Producto Ambiental (EPD) y el software LCA One Click en un edificio industrial representativo (véase Figura 1), para identificar puntos críticos de las estrategias propuestas. La siguiente sección describe las fases realizadas para el desarrollo de la investigación:

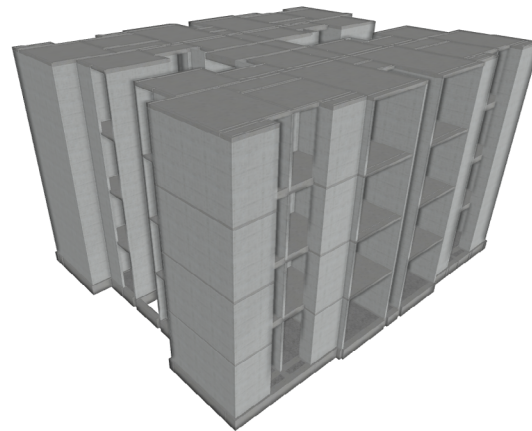


Figura 1. Representación digital BIM del edificio industrializado (elaboración propia)

Fase 1. Identificación de tendencias y parámetros

Este estudio bibliométrico realiza un análisis sistemático de la producción científica internacional sobre la huella de carbono de los edificios industrializados, utilizando registros de la base de datos Scopus. Para complementar este análisis global, también se realizó una revisión bibliográfica a nivel nacional para identificar las principales tendencias de investigación y los parámetros específicos que influyen en la reducción de la huella de carbono en edificios industrializados en Colombia.

Fase 2. Análisis de la huella de carbono en las etapas A1–A5

El carbono incorporado en las etapas A1–A5 de los edificios industrializados se cuantifica mediante un modelo representativo desarrollado utilizando el software LCA One Click, que cumple con las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044 — los fundamentos metodológicos de la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA). Asimismo, la herramienta está completamente alineada con las normas europeas EN 15978 y EN 15804, que regulan la evaluación ambiental de edificios y las Declaraciones de Productos Ambientales (EPD), garantizando la coherencia con los marcos internacionales aplicables al sector de la construcción.

Inicialmente, se calculan las cantidades materiales del edificio —centradas en los sistemas estructurales y de cimentación (hormigón y acero de refuerzo)— para determinar el impacto en la huella de carbono utilizando diferentes EPDs (A1–A3). Además, se hacen suposiciones para el transporte (A4) y los procesos de construcción (A5) para evaluar el impacto constructivo del estudio de caso base: un arquetipo representativo de un edificio residencial industrializado, en adelante denominado escenario inicial o Modelo 1.

Fase 3. Estrategias de reducción y priorización

Basándose en la tendencia, el análisis de parámetros y el modelo representativo, se identifican y priorizan estrategias para reducir la huella de carbono en las etapas de materiales (A1–A3) y construcción (A4–A5) de los edificios industrializados. Los factores que influyen en la reducción

de la huella de carbono se determinan y clasifican primero; después, se desarrollan esquemas de toma de decisiones y se definen estrategias para proponer una alternativa mejorada — en adelante denominada escenario alternativo mejorado o Modelo 2.

Resultados

Los resultados se presentan según las tres fases metodológicas. Primero, la revisión bibliométrica y bibliográfica sintetiza tendencias y parámetros clave; luego, el modelo representativo estima el GWP100 en las etapas A1–A5 del análisis del ciclo de vida; Finalmente, las estrategias de reducción se evalúan y priorizan según su efecto.

Identificación de tendencias y parámetros

Para el análisis bibliométrico, la búsqueda más eficaz se obtuvo utilizando las siguientes palabras clave: *Edificación industrializada* y *Huella de Carbono*, que arrojó 1.786 documentos relacionados. Tras procesar los datos exportados desde Scopus en formato BibTeX, la información se analizaba en RStudio utilizando el *paquete Bibliometrix*. Se aplicó un proceso de filtrado, que resultó en 1.765 documentos. Estos registros se refinaron aún más para eliminar duplicados y asegurar que los metadatos estuvieran completos, garantizando la calidad de los resultados y la trazabilidad.

Producción bibliográfica

La Figura 2 muestra que los edificios industrializados y la huella de carbono apenas se publicaban antes de 2006, con menos de tres documentos al año. A partir de ese año, la investigación y publicaciones sobre el tema aumentaron significativamente, lo que pone de manifiesto su creciente relevancia y alcanzó 364 artículos indexados en Scopus para 2024.

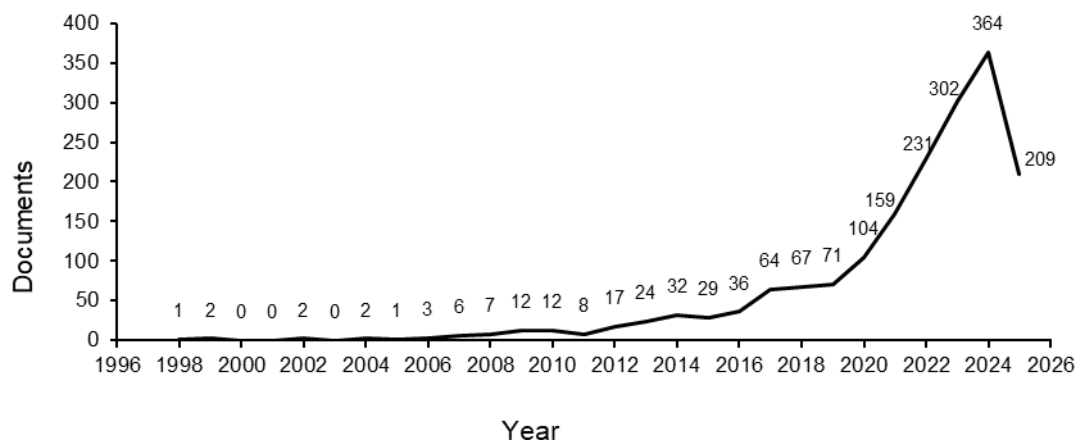


Figura 2. Producción científica anual relacionada con la huella de carbono y los edificios industrializados entre 1996 y 2025 (explicación del autor)

Red de coocurrencia por palabras clave

La red de coocurrencia de palabras clave que se muestra a continuación revela tres grupos temáticos bien definidos de nodos interconectados (véase la Figura 3):

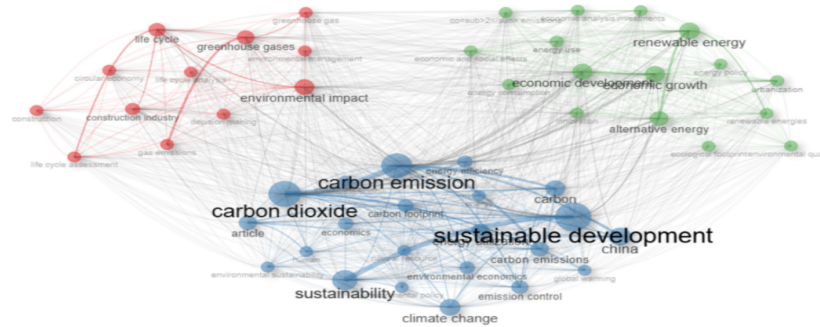


Figura 3. Red de co-ocurrencia por palabras clave (elaboración del autor usando Biblioshiny/ Bibliometrix)

Agrupamiento azul (centro a abajo): Agrupa los términos más frecuentes — desarrollo sostenible, emisión de carbono, dióxido de carbono y sostenibilidad. Su tamaño y posición central indican que la mitigación de emisiones y el desarrollo sostenible constituyen la columna vertebral del campo, sirviendo como puente que conecta casi todos los demás conceptos.

Cúmulo Rojo (izquierda): Concentra términos como ciclo de vida, industria de la construcción, economía circular y evaluación del ciclo de vida, indicando estudios centrados en evaluar el impacto ambiental de los edificios a lo largo de todo su ciclo de vida e introducir estrategias de economía circular en procesos constructivos.

Clúster Verde (arriba derecha): Integra energías renovables, energías alternativas, desarrollo económico y crecimiento económico. Este clúster está dominado por investigaciones que vinculan la transición energética con políticas de expansión económica y urbanización.

Tendencias de investigación

Enfoque temático. Según los clústeres analizados, el foco principal de la investigación gira en torno al desarrollo sostenible, las emisiones de carbono y el cambio climático. Además, desde 2023, enfoques tecnológicos como el BIM y la impresión 3D han ganado atención, y para 2025 se proyecta un mayor énfasis en la construcción modular y el análisis económico.

El análisis bibliométrico revela que las tendencias actuales de investigación sobre la huella de carbono de los edificios industrializados abordan principalmente:

- i. la incorporación de herramientas digitales como BIM para integrar el análisis del ciclo de vida en las primeras etapas del diseño;
- ii. la adopción de sistemas de construcción industrializados y modulares que enfatizan la

- eficiencia de materiales y la reducción de emisiones;
- iii. la exploración de estrategias de sustitución de clínker, el uso de acero reciclado y los áridos reciclados; y
- iv. el creciente enfoque en modelos de economía circular y evaluación de políticas para la descarbonización sectorial.

Estas líneas de investigación representan el núcleo de la agenda actual y definen los parámetros más ampliamente estudiados en la literatura especializada.

Parámetros de investigación

El análisis bibliométrico internacional identificó tendencias de investigación y los parámetros que influyen directamente en la reducción de la huella de carbono en edificios industrializados. Los parámetros más relevantes se resumen a continuación:

Materiales de construcción

La selección y composición de los materiales de construcción destacan como uno de los factores más determinantes para reducir la huella de carbono. Destacan especialmente la sustitución parcial de clínker en la producción de cemento utilizando SCMs (escoria, pozolanas, LC³, cenizas volantes) y acero y áridos reciclados.

Procesos de construcción industrializados

Los procesos constructivos juegan un papel decisivo en el impacto ambiental global. El uso de técnicas y tecnologías industrializadas ha demostrado ser efectivo para reducir las emisiones de carbono—especialmente la prefabricación y la construcción modular—que presentan impactos de CO₂ más bajos que los métodos tradicionales de construcción. Del mismo modo, se enfatiza la optimización de procesos mediante la integración de herramientas BIM y LCA.

Energía y emisiones

La gestión energética es otro factor clave para reducir la huella de carbono de los edificios industrializados. Las estrategias incluyen la transición a fuentes de energía renovable durante la construcción y la operación, y la reducción del consumo energético mediante un diseño eficiente.

Diseño estructural y optimización

Las decisiones de diseño estructural afectan directamente al consumo de materiales y, en consecuencia, a la huella de carbono. Se destacan parámetros como la modularidad, la impresión 3D para minimizar el desperdicio y la optimización de secciones para reducir el uso de materiales.

Gestión Económica y de Políticas

Por último, las dimensiones económicas y regulatorias emergen como factores transversales en la implementación de estrategias bajas en carbono.

En Colombia, reducir la huella de carbono en el sector de la construcción se ha convertido en una prioridad nacional alineada con estrategias como la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en

Carbono (ECDBC), que promueve la descarbonización integral del sector mediante la eficiencia energética, el uso de energías renovables y la gestión sostenible de materiales y residuos.

Varios estudios académicos locales han aplicado la Evaluación del Ciclo de Vida (ACL) para cuantificar y optimizar la huella de carbono de los edificios, destacando que los materiales estructurales suministrados localmente—principalmente hormigón y acero de refuerzo—representan la mayoría de las emisiones incorporadas en las construcciones industrializadas (18). Asimismo, la construcción modular e industrializada ha sido reconocida como un enfoque práctico para reducir residuos, acelerar procesos y minimizar los impactos ambientales en el lugar.

Análisis de la huella de carbono en las etapas A1–A5

Una reducción integral de la huella de carbono de un edificio requiere abordar primero las emisiones incorporadas generadas antes de la ocupación: extracción de materias primas, fabricación de insumos y actividades de construcción importantes (módulos A1–A5 de las normas EN 15804 o EN 15978). Por ello, esta fase tenía como objetivo cuantificar la huella de carbono incorporada de un edificio industrial representativo durante sus fases de producción y construcción, utilizando Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) como fuente principal de datos y el software LCA One Click como plataforma de modelado y cálculo.

Definir el límite del sistema es esencial para el análisis de la huella de carbono del edificio industrializado. NTC-ISO 14044 define esto como “un límite basado en un conjunto de criterios que especifican qué procesos unitarios forman parte del sistema en estudio”, asegurando que todos los procesos analizados a lo largo de las diferentes etapas sean consistentes, transparentes y comparables. El límite del sistema propuesto para el arquetipo se muestra en la Figura 4

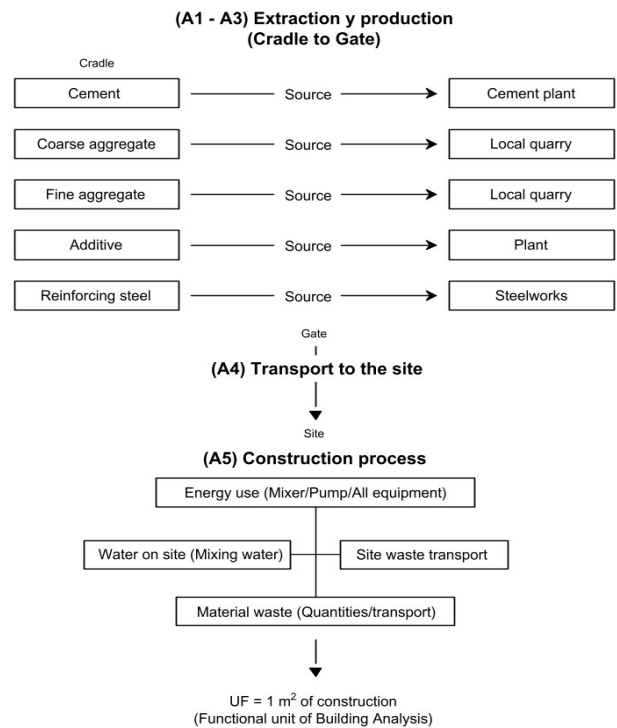


Figura 4. Diagrama que ilustra el límite del sistema para los módulos A1–A5 (elaboración propia)

El arquetipo corresponde a un edificio residencial de media altura (4 plantas) con un sistema de construcción industrializado, con una superficie total construida de 732,12 m² y una superficie construida aproximada de 183,03 m² por planta. La estructura consta de cimientos poco profundos que utilizan losas y vigas de cimentación, muros de hormigón armado portantes y sistemas de suelos y techados compuestos por losas sólidas con grosores que van de 0,10 a 0,12 m.

El análisis se centra exclusivamente en el sistema estructural —cimientos y superestructura— hecho de hormigón armado, ya que estos elementos representan entre el 70% y el 90% del carbono total incorporado en edificios de este tipo (6).

El estudio adopta un contexto colombiano, conforme al Código de Construcción Resistente a Terremotos (NSR-10), que establece requisitos de diseño y especificaciones de materiales para hormigón armado y acero estructural para garantizar la resistencia y ductilidad de los edificios en un país con alta actividad sísmica. En las etapas A1–A3, se considera el suministro de cemento producido localmente con añadidos minerales y acero reciclado. Al mismo tiempo, el módulo A4 evalúa el transporte terrestre desde la planta hasta la obra, representando el sistema logístico predominante en el sector.

Según datos de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la mezcla energética colombiana, utilizada para los procesos eléctricos de producción y construcción (A1–A5), tiene una alta cuota de generación hidroeléctrica (75%), seguida de gas natural (13%) y carbón (8%), resultando en una matriz energética de baja intensidad de carbono (26). Finalmente, el análisis incorpora cadenas de suministro nacionales típicas y tasas de residuos consistentes con las prácticas locales de construcción y las directrices de eficiencia, representando con precisión las condiciones de un edificio industrializado en Colombia.

Materiales de construcción A1–A3

Para el análisis de la huella de carbono en las etapas A1–A3 (producción, transporte y fabricación de materiales), fue necesario determinar el origen de los materiales utilizados para identificar las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) más representativas y las cantidades correspondientes de materiales utilizadas en el edificio.

La Tabla 1 presenta los datos del arquetipo utilizados para calcular la huella de carbono para los módulos A1–A3. El edificio arquetípico se caracterizaba por una superficie total construida de 732,12 m².

Tabla 1. Cantidades y tipo de recurso para el cálculo de kg CO₂ e/kg para el módulo A1–A3

Materiales	Cantidad (kg)	Fuente (LCA de un solo clic)	Impacto kg CO2e/kg
Cemento	109.197,99	CEM III/A, 50% GGBS	0,65
Agregado fino	224.468,34	Arena utilizada en la industria	0,0036
Agregado grueso	190.684,19	Roca triturada, 8–16 mm	0,0043
Aditivo	1.638,55	Aditivo de hormigón (EFCA)	1,31
Refuerzo de acero	24.433,92	Acero de refuerzo (varilla de varilla)	0,77

Fuente. Elaboración propia

Transporte a la obra de construcción (A4)

Para calcular el impacto ambiental del transporte al lugar de construcción del módulo A4, se analizaron las rutas de transporte para determinar las distancias y tipos de transporte utilizados en cada segmento.

Según la LCA de One Click, este módulo incluye el transporte de productos y embalajes desde la planta de producción del fabricante hasta la obra de construcción. Es necesario identificar la ubicación de las instalaciones y el modo de transporte. Pueden darse varios escenarios, principalmente dependiendo de si un producto se entrega a un destino específico o de si el impacto del transporte varía según el número de lugares de entrega según los datos de ventas. Si solo se considera una ubicación, debe identificarse el modo de transporte (alternativamente, se puede usar una distancia media y un tipo de transporte), y se debe calcular la distancia. Se deben utilizar fuentes fiables para estimar distancias según el medio de transporte (barco, camión, etc.).

La Tabla 2 presenta la cadena de transporte completa y el tipo de vehículo asignado a cada ruta, definido según el material transportado y la distancia recorrida para el arquetipo bajo las condiciones propuestas.

En el cálculo del módulo A4 (transporte de materiales), solo se consideró la distancia de salida entre el lugar de producción y el sitio de construcción, ya que el perfil de transporte utilizado —camión, doble remolque, 30–34 toneladas, E5 (+A1), año de referencia 2018, LKW-Zug— según la base de datos ÖKOBAUDAT ya incluye la media de ida y vuelta en vacío dentro de sus factores de emisión. Este perfil, desarrollado según la EN 15804 +A1, incorpora viajes de ida y vuelta representativos basados en el mercado, evitando así el doble conteo de distancias y cargas.

Tabla 2. Detalle de transporte para calcular el módulo A4

Referencia del perfil	Software / Fuente	Descripción	Distancia (km)	Impacto kgCO2e/tonelmilómetro
Camión-remolque doble, 30-34 toneladas, E5	LCA de un solo clic (OKOBAUDAT)	Transporte de cemento (etapa 1)	450	0,0644
		Transporte de acero (etapa 1)	507	
		Transporte de encofrados (tramo 1)	234	
Camión, pequeño, 12 – 14 toneladas, E5	LCA de un solo clic (OKOBAUDAT)	Transporte de áridos gruesos (tramo)	19,2	0,1289
		Transporte de áridos finos (tramo)	19,2	
		Transporte de cemento (etapa 2)	4,5	
		Transporte de acero (segunda etapa)	4,5	

Referencia del perfil	Software / Fuente	Descripción	Distancia (km)	Impacto kgCO2e/tonelmetro
Camión,	LCA de un solo clic (OKOBAUDAT)	Transporte aditivo (tramo 1)	601	0,0897
Furgón de reparto, 7,5-12 toneladas, E5	LCA de un solo clic (OKOBAUDAT)	Transporte aditivo (tramo 2)	4,5	0,2277

Fuente. Elaboración propia

Proceso de construcción (Instalación A5)

Según la EN 15978, los impactos asociados a las actividades de construcción in situ se informan en el módulo A5 de la Evaluación del Ciclo de Vida a nivel de edificio (LCA). De acuerdo con esto, el LCA One Click divide el módulo A5 en los siguientes componentes: consumo energético in situ, uso de agua in situ, residuos materiales y gestión y transporte de residuos/envases. Metodológicamente, la evaluación de edificios también puede referirse a la ISO 21931-1, adoptada en Colombia como NTC-ISO 21931-1:2022.

Según la NTC-ISO 21930:2021, el módulo de información “instalación” comprende la ejecución del producto de construcción dentro de cualquier tipo de obra civil e incluye los siguientes elementos:

A5, residuos de productos de construcción, incluidos los procesos de producción (A1 a A3) y el transporte al lugar (A4), para compensar el material perdido debido a los residuos de productos;

A5, tratamiento de residuos derivados de envases y pérdidas de productos, incluyendo el transporte que ocurre durante los procesos de construcción hasta el límite del sistema, entre sistemas de producto o hasta la eliminación final de residuos;

A5, instalación del producto en la obra, incluyendo la fabricación y transporte de materiales auxiliares, así como cualquier consumo directo de energía o agua dulce necesario para la instalación en el lugar;

A5, preparación del sitio específico para la instalación del producto declarado, incluyendo materiales auxiliares y gestión de residuos, cuando corresponda.

Para el cálculo de la huella de carbono, se utilizaron referencias para equipos eléctricos y diésel, basadas en los recursos listados en la Tabla 3.

Tabla 3. Origen del recurso para calcular kg CO2e del equipo

Equipo	Referencia/Fuente de recursos	País/Año	Energía o consumo	Impacto kgCO2e/pcs
Equipos eléctricos	Electricidad, Colombia, 2019 / One Click LCA	Colombia/2022	0,66 kWh/m2	0,38 kg CO2e/kWh
Equipamiento diésel	Diésel combustión en máquina de construcción / LCA de un clic	Mundial/2023	0,88 L/m2	3,35 kg CO2e/L

Fuente. Elaboración propia

Huella de carbono del edificio Arquette

Tras introducir las cantidades de material y configurar las suposiciones de transporte (A4) y construcción (A5) —incluyendo el consumo energético de equipos eléctricos y alimentados por combustible— el cálculo se realizó utilizando el software LCA One Click, que cumple con la EN 15978, empleando EPDs conforme a la EN 15804 +A1.

La herramienta proporciona resultados divididos por módulos A1–A5 y por categorías de impacto. Este estudio informó del GWP100 (Potencial de Calentamiento Global durante 100 años) expresado en kg CO₂e como el principal indicador (véase la Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de resultados por categoría según One Click LCA

Categoría de resultados		Calentamiento global kg CO2e	Almacenamiento biogénico de carbono kg CO2e bio	Agotamiento del ozono kg CFC11e	Acidificación kg SO2e	Eutrofización kg PO4e	Formación de ozono en la atmósfera inferior kg Ethenee	Potencial de agotamiento abiótico (ADP-elementos) para recursos no fósiles kg Sbe	Potencial de agotamiento abiótico (ADP-combustibles fósiles) para los recursos fósiles MJ
A1-A3 (?)	Producto de la construcción	93252,31	0	0	261,25	76,69	14,57	0,36	30327139,99
(-) A4 (?)	Transporte a la construcción	6264,65	0	0	14,3	3,4	-4,71	0	83696,86
A4	Transporte a la obra	6185,45		0	14,12	3,36	-4,65	0	82639,42
A4-leg2	Transporte a la obra - Tramo 2	79,19	0	0	0,18	0,04	-0,06	0	1057,44
(-) A5 (?)	Proceso de instalación/construcción	3355,35		0	7,21	1,62	0,47	0,01	632055,19
A5a	Operaciones en el sitio y gestión de residuos en el sitio	2351,14		0	4,35	0,8	0,37	0	32463,36
A5b	Transporte de residuos del sitio	5,6		0	0,01	0	-0	0	74,71

A5c	Obra de construcción - Residuos materiales - Materiales	937,97		0	2,71	0,78	0,15	0	598707,09
A5d	Obra de construcción - Residuos materiales - Transporte	60,64		0	0,14	0,03	-0,05	0	810,04
	Total	102872,31	0	0	282,76	81,72	10,33	0,36	31042892,04
	Por superficie interior bruta m2	140,51	0	0	0,39	0,11	0,01	0	42401,37

Fuente: Preparado por los autores a partir de los resultados de One Click LCA

Para el alcance A1–A5, el GWP100 total del edificio es de 102.872,31 kg de CO₂ e (≈ 103 t CO₂e). Cuando se normaliza por la unidad funcional, esto corresponde a 140,51 kg de CO₂e/m² de superficie construida.

En la Figura 5, se muestran los valores GWP100 de los recursos, ya considerando los impactos de A1 a A5. Se puede observar que el recurso con mayor contribución a GWP100 es el cemento, que representa el 72,64%, seguido del acero de refuerzo con un 19,22%. Cabe destacar que el consumo de combustible tiene un impacto relativamente bajo (2,02%), aunque sigue siendo superior al consumo eléctrico de los equipos in situ (0,17%).

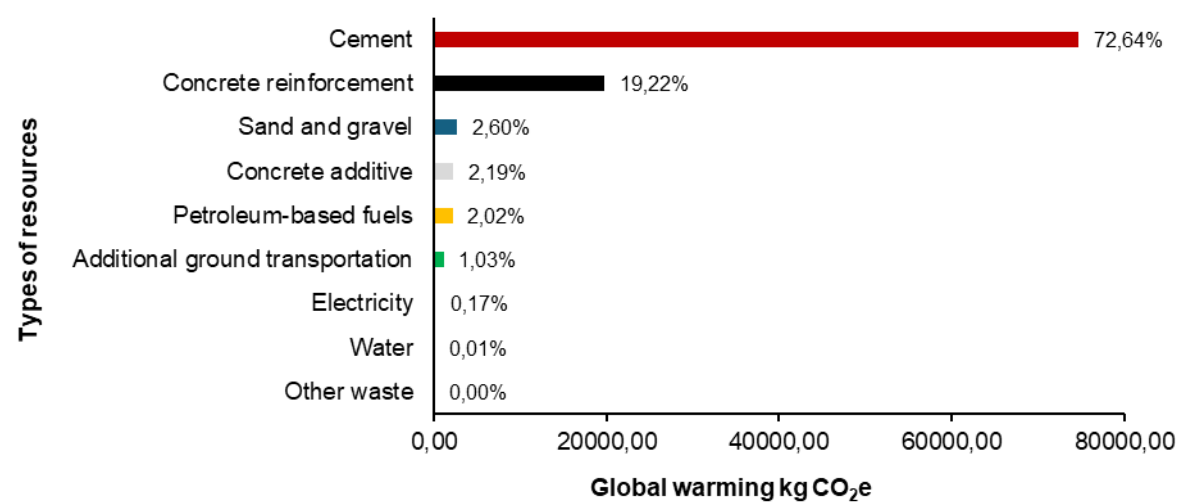


Figura 5. Calentamiento global kg CO₂e por tipo de recurso (explicación propia)

En cuanto al sistema estructural, la Figura 6 informa del GWP100 de la estructura dividido por componentes. Los valores corresponden a la suma de los impactos evaluados (A1–A5), excluyendo el consumo de energía y combustible procedente del equipo, el uso de agua, la gestión de residuos y otras actividades de transporte o viaje. Los kg de CO₂e se concentran principalmente en el bastidor portante (49,30%) y en las losas superiores (28,40%), seguidos por la cimentación (21,05%).

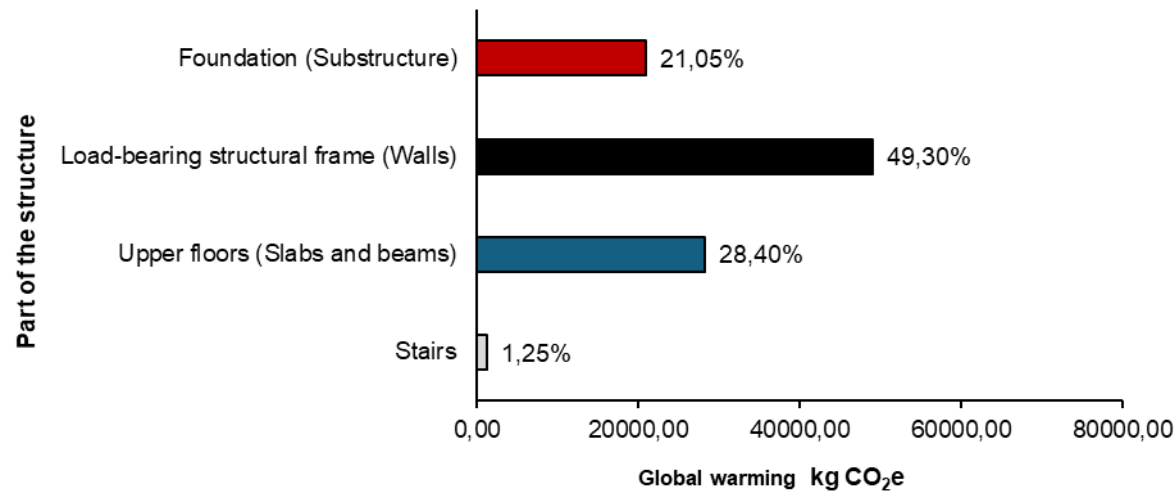


Figura 6. Potencial de calentamiento global (kg CO₂e) por Componentes Estructurales (elaboración propia)

En la Figura 7, es evidente que el impacto de GWP100 se concentra principalmente en los módulos A1–A3 (producción de material). A nivel del sistema constructivo, la estructura portante y las losas superiores son las que más contribuyen, mientras que en cuanto al tipo de material, el cemento ocupa el primer lugar, seguido del acero de refuerzo.

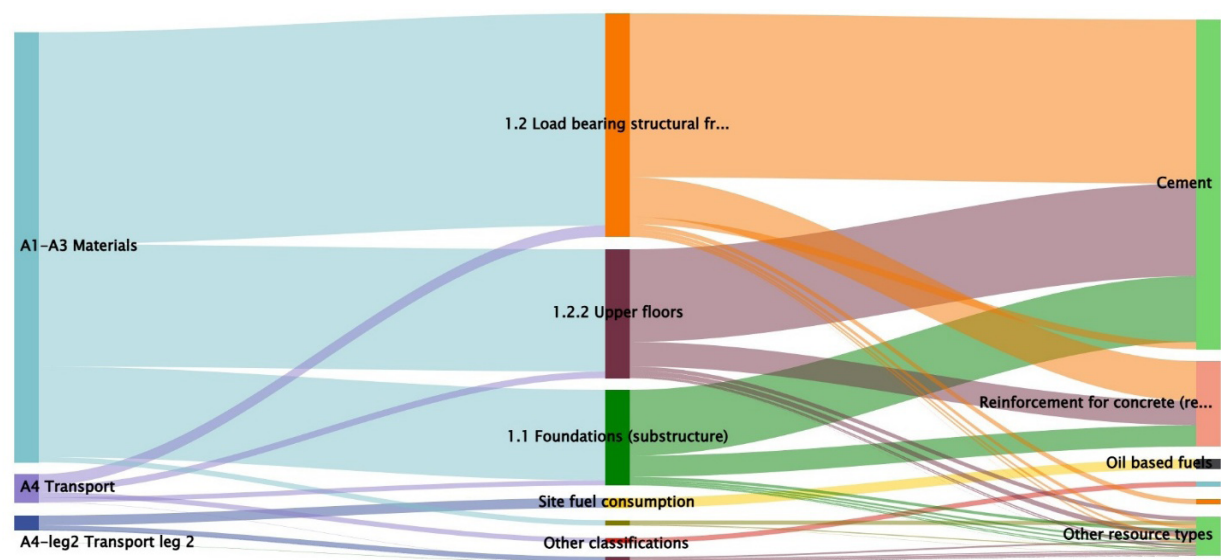


Figura 7. Diagrama de Sankey (creación propia usando LCA de One Click)

Comparación de escenarios

Cuando se propuso un escenario que incorporara materiales más sostenibles, distancias de transporte más cortas y electrificación del equipo in situ, se redujo la huella de carbono del edificio arquetípico. La Tabla 5 presenta el plan de cambios implementados para el nuevo escenario.

Tabla 5. Cambios realizados con materiales alternativos (A1-A3) y estrategia en A4 y A5

Paso	Descripción del cambio	Referencia de recursos	Modelo de impacto 1	Impacto Modelo 2
A1-A3	Cemento de alto horno con escoria al 60%	CEM III/A, 60% GGBS	0,65 kg CO2e/kg	0,40 kg CO2e/kg
	Acero de refuerzo: 100% chatarra	Chatarra de acero de refuerzo (Gerdau, planta de Tultitlán)	0,77 kg CO2e/kg	0,38 kg CO2e/kg
A4	Proveedor de cemento cambiado (205 km)	Camión, doble remolque, 30-34 toneladas, E5	0,0644 kg CO2e/tkm	0.0383 kg CO2e/tkm
A5	La bomba diésel cambió a eléctrica.	Electricidad, Colombia, 2020, LCA de un solo clic	3,35 kg CO2e/L	0,38 kg CO2e/kWh

Fuente. Elaboración propia

Al calcular la huella de carbono del edificio bajo el nuevo escenario (Modelo 2), se obtuvo un impacto de 85,57 kg CO₂e/m². En comparación con el escenario inicial (Modelo 1), esto representa una reducción del 39,10 % en la huella de carbono en las etapas A1–A5 (véase la Figura 8).

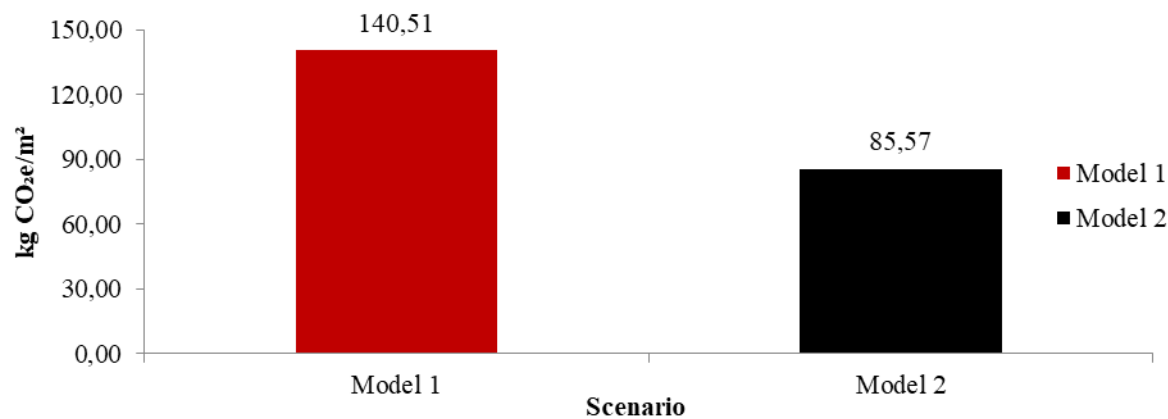


Figura 8. Comparación de escenarios de reducción de la huella de carbono (Explicación propia)

Estrategias de reducción y priorización

Las estrategias propuestas se centraron en las etapas del carbono incorporado dentro del límite del sistema hasta la obra, incluyendo las operaciones in situ (A1–A5). El marco general de las estrategias se presenta en la Figura 9.

Las estrategias se priorizaron en función de los parámetros con mayor influencia en la huella de carbono (GWP100) y en el rendimiento de los materiales, el transporte y los procesos de instalación para el arquetipo dentro de las etapas A1–A5.

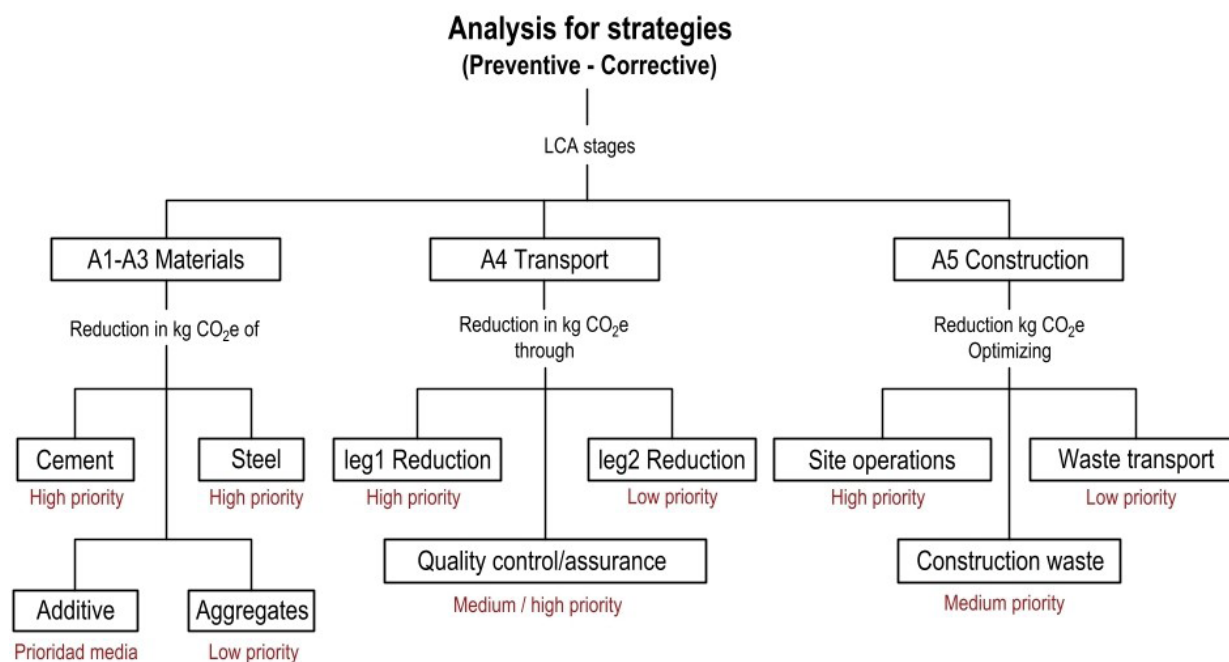


Figura 9. Marco guía para el análisis de estrategias (elaboración propia)

Estrategias para las etapas A1–A3 (Materiales)

Las estrategias propuestas se centraron principalmente en los materiales con mayor contribución a la huella de carbono —concretamente el cemento y el acero de refuerzo— aunque también se consideraron medidas adicionales para otros materiales.

Para reducir la huella de carbono generada por el cemento, como se ha identificado a lo largo de este estudio, es esencial sustituir el clínker por materiales cementicios suplementarios (SCM), como escoria, pozolanas y otros.

En la producción de cemento, se pueden utilizar insumos alternativos en proporciones específicas, lo que ayuda a reducir el impacto en la huella de carbono. La Tabla 6 presenta los porcentajes de peso de cada insumo convencional y su alternativa sostenible, según informa el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia en su guía de materiales de construcción sostenibles.

Según la guía de materiales de construcción sostenibles, una vez que el cemento se utiliza para producir hormigón, no puede recuperarse para reciclaje. Sin embargo, los residuos o el hormigón demolido pueden reciclarse durante la fabricación de nuevo cemento en cantidades controladas, ya sea como materia prima alternativa para la producción de clínker o como aditivo moliendo clínker con yeso y otros áridos.

Tabla 6. Comparaciones entre insumos convencionales y alternativos de cemento

Entradas convencionales		Entradas alternativas	
Áridos de piedra	80%	Cal residual de la producción, construcción y demolición de acetileno	75%
Yeso	10%	Materiales pozzolánicos: escoria y ceniza (residuos térmicos), ceniza de cáscara de arroz, residuos de construcción y demolición	25%

Fuente: Adaptado del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia

El uso de cementos de bajo GWP reduce significativamente las emisiones de kg de CO₂ en los edificios industrializados, que tienen un alto consumo de hormigón —y, en consecuencia, de cemento—. Por ello, se recomienda seleccionar proveedores con una Declaración de Producto Ambiental (EPD) conforme a la EN 15804 / NTC-ISO 21930:2021, comparar los resultados y elegir la opción con la menor huella de carbono.

En el caso del acero, como se muestra en la Tabla 7, siguiendo las recomendaciones de la guía de materiales de construcción sostenibles, los insumos convencionales pueden sustituirse o sustituirse por materiales alternativos, reduciendo así los impactos medioambientales generados a lo largo del ciclo de vida del material.

Tabla 7. Comparaciones entre insumos convencionales y alternativos para el acero

Entradas convencionales		Entradas alternativas	
Carbón	5%	Chatarra	100%
Mineral de hierro	95%		

Fuente: Adaptado del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia

Una estrategia eficaz para reducir la huella de carbono es reemplazar parcialmente el árido grueso natural por árido grueso reciclado (RCA) procedente de residuos de construcción y demolición (CDW). Para hormigón estructural, no es factible la sustitución total: la NTC 6421 permite una sustitución máxima del 20% de RCA para hormigones hidráulicos estructurales de hasta 35 MPa, siempre que el material cumpla con la NTC 174 y la clasificación de componentes según la NTC 6422, así como con las disposiciones del Capítulo C.5 del Código de Construcción Resistente a Terremotos de Colombia NSR-10.

Aunque el impacto directo de las mezclas en A1–A3 es bajo debido a su baja dosis, son una estrategia importante ya que permiten la reducción del cemento sin comprometer el rendimiento. Se recomienda seleccionar superplastificantes de éter policarboxilato (PCE) para reducir la proporción agua/cemento (p/c) y lograr un menor contenido de cemento por metro cúbico manteniendo la misma trabajabilidad; verificar la compatibilidad con cementos de baja calidad de clínker y SCM (escoria, pozolanas, LC3) para evitar retrasos de ajuste no deseados o aire retenido; y utilizar mezclas con EPDs y datos de proveedores que indiquen la menor huella de carbono por unidad declarada.

Estrategias para la Etapa A4 (Transporte)

- Las estrategias se centraron en reducir las distancias de transporte, especialmente en la etapa 1, que representa las mayores emisiones debido a la gran distancia entre la planta del proveedor y la obra.
- Priorizar proveedores locales o regionales para minimizar las distancias de viaje; Programar entregas consolidadas durante las horas poco valle y establecer la logística de devolución para reducir los viajes vacíos.
- Sustituir los tramos de larga distancia por transporte ferroviario o de barcaza, manteniendo el transporte por camión solo para el último tramo.
- Exigir el uso de vehículos EURO VI, biocombustibles o vehículos eléctricos en zonas urbanas.

Estrategias para la Etapa A5 (Construcción)

- Para definir estrategias para reducir la huella de carbono en A5, se priorizó las operaciones in situ, ya que el consumo de combustible y electricidad son los principales factores que contribuyen al impacto de este módulo.
- Implementa un plan de gestión energética del sitio para optimizar los tiempos de inactividad del equipo.

- Cuando sea posible, promover la electrificación de grúas y maquinaria pequeña o el uso de biocombustibles.
- Adoptar diseño modular y prefabricación para reducir los cortes, asegurar la entrega justo a tiempo del material y proteger los depósitos para minimizar las pérdidas.
- Implementar la segregación in situ, establecer acuerdos de devolución de embalaje y seleccionar instalaciones de valoración cercanas.
- Optimiza la logística de residuos (rutas, modos y cargas). Establecer procedimientos y planificación adecuados in situ para optimizar el movimiento de residuos, es decir, ubicar estratégicamente las áreas de almacenamiento de residuos.
- Selecciona los vertederos más cercanos para la retirada y el transporte de residuos.

Discusión de los resultados

En el Modelo 1, la fase de producción de materiales (A1–A3) fue el principal determinante de la huella de carbono del arquetipo de la construcción industrializada, representando el 90,65% del impacto total. El cemento representó el 72,64% de las emisiones, mientras que el acero de refuerzo aportó el 19,22%.

Los módulos de transporte (A4) y de construcción (A5) representaron el 6,09% y el 3,26%, respectivamente, de las emisiones totales, lo que indica una contribución menor pero significativa. En A4, las emisiones se atribuyeron principalmente al transporte de larga distancia por camiones pesados. En cambio, en el A5, el consumo de diésel por maquinaria superó al consumo eléctrico, lo que confirma la importancia de la optimización logística y la transición hacia procesos de construcción bajos en carbono.

Finalmente, el escenario alternativo (Modelo 2) logró una reducción del 39,1% en la huella de carbono del edificio inicial del arquetipo, validando la eficacia de estrategias como la sustitución parcial de clínker por escoria, el uso de acero 100% reciclado, la optimización del transporte y la electrificación de equipos in situ. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) locales y actualizadas. Aunque este estudio se basó en un edificio representativo, la metodología aplicada constituye una herramienta útil para guiar decisiones de diseño y construcción en el contexto colombiano.

Conclusiones

El estudio de la huella de carbono en los edificios industrializados es un campo emergente que ha evolucionado de ser poco explorado a expandirse rápidamente, ganando relevancia desde 2006 con una tasa de crecimiento anual de aproximadamente el 21,9% hasta 2024. Las líneas de investigación se centran en el desarrollo sostenible, las emisiones de carbono y el cambio climático, siendo la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), el Modelado de la Información de Edificios (BIM) y la impresión 3D como temas destacados.

Para reducir la huella de carbono, los principales parámetros identificados son la selección y composición de los materiales, en particular la sustitución parcial del clínker por Materiales Cementicios Suplementarios (SCM), el uso de acero reciclado y áridos y, complementariamente, la adopción de técnicas de construcción industrializadas como la prefabricación y la modularidad, así como herramientas digitales como la implementación del BIM.

Al evaluar la huella de carbono del edificio arquetípico, la selección de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) para cada material resultó crucial, ya que los factores de impacto y los límites del sistema definidos por cada EPD determinan los impactos unitarios (por ejemplo, kg CO₂e/kg) que, al multiplicarse por las cantidades modeladas, definen la huella total (kg CO₂e). Este enfoque permite identificar las etapas del ciclo de vida (A1–A5) con mayor contribución y donde deben priorizarse las estrategias de reducción.

Al modelar un escenario más sostenible, seleccionando materiales con EPDs de menor impacto según criterios de sostenibilidad para un arquetipo, se logró una reducción del 39,10% (–54,94 kg CO₂e/m²) en comparación con el modelo inicial. El estudio confirma que la fase de materiales (A1–A3) concentra la mayor parte de la huella de carbono y, por tanto, debe ser priorizada en el LCA.

Las estrategias de reducción de la huella de carbono en edificios industrializados deben definirse desde las primeras etapas de diseño y planificación, pasando por la selección de EPDs de bajo impacto y la optimización logística. Los resultados confirman que el mayor potencial de reducción se encuentra en A1–A3, donde el cemento es el mayor contribuyente, seguido del acero de refuerzo. En resumen, las acciones de mitigación de la huella de carbono en edificios industrializados deberían centrarse principalmente en A1–A3 mediante la selección de EPDs más sostenibles, sin pasar por alto las A4–A5, donde también son posibles mejoras: cambiar de diésel a energía eléctrica en equipos in situ reduce los impactos en A5, y acortar la distancia de transporte del cemento al obtener a un proveedor más cercano tiene un efecto positivo en el módulo A4.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Jesús David Márquez Montejo. **Análisis formal:** Jesús David Márquez Montejo. **Investigación:** Jesús David Márquez Montejo. **Metodología:** Romel Jesús Gallardo Amaya. **Dirección de Proyecto:** Romel Jesús Gallardo Amaya. **Recursos:** Jesús David Márquez Montejo. **Validación:** Jesús David Márquez Montejo. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Jesús David Márquez Montejo. **Redacción - revisión y edición - Elaboración:** Romel Jesús Gallardo Amaya.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses relacionado con esta investigación.
Aspecto ético: No declaran.

Referencias

1. Butters C, Cheshmehzangi A, Bakhshoodeh R. Sustainable Construction: The Embodied Carbon Impact of Infrastructures and Landscaping. Urban Science 2024, Vol 8, Page 76 [Internet]. 28 de junio de 2024 [citado 10 de septiembre de 2025];8(3):76. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030076>

2. Bautista J, Loaiza N. Impactos de la construcción sostenible y tradicional a nivel ambiental. *Boletín Semillas Ambientales*. 2018;12.
3. Khaiyum MZ, Sarker S, Kabir G. Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. *Sustainability* 2023, Vol 15, Page 15407 [Internet]. 29 de octubre de 2023 [citado 10 de septiembre de 2025];15(21):15407. <https://doi.org/10.3390/su152115407>
4. Shivaprasad KN, Yang HM, Singh JK. A path to carbon neutrality in construction: An overview of recent progress in recycled cement usage. *Journal of CO2 Utilization* [Internet]. 1 de mayo de 2024 [citado 10 de septiembre de 2025];83:102816. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102816>
5. Cheng D, Reiner DM, Yang F, Cui C, Meng J, Shan Y, et al. Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nat Commun* [Internet]. 1 de diciembre de 2023 [citado 10 de septiembre de 2025];14(1):1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x>
6. Myint NN, Shafique M. Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Case Studies in Construction Materials* [Internet]. 1 de julio de 2024 [citado 10 de septiembre de 2025];20:e03024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03024>
7. Röck M, Saade MRM, Balouktsi M, Rasmussen FN, Birgisdottir H, Frischknecht R, et al. Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Appl Energy* [Internet]. 15 de enero de 2020 [citado 10 de septiembre de 2025];258:114107. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
8. Zhong X, Hu M, Deetman S, Steubing B, Lin HX, Hernandez GA, et al. Global greenhouse gas emissions from residential and commercial building materials and mitigation strategies to 2060. *Nat Commun* [Internet]. 1 de diciembre de 2021 [citado 10 de septiembre de 2025];12(1):1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26212-z>
9. Sizerici B, Fseha Y, Cho CS, Yildiz I, Byon YJ. A review of carbon footprint reduction in construction industry, from design to operation. *Materials* [Internet]. 1 de octubre de 2021 [citado 10 de septiembre de 2025];14(20). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma14206094>
10. Ma L, Azari R, Elnimeiri M. A Building Information Modeling-Based Life Cycle Assessment of the Embodied Carbon and Environmental Impacts of High-Rise Building Structures: A Case Study. *Sustainability* 2024, Vol 16, Page 569 [Internet]. 9 de enero de 2024 [citado 11 de septiembre de 2025];16(2):569. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16020569>
11. Wei J, Ge B, Zhong Y, Lee TL, Zhang Y. Comparative analysis of embodied carbon in modular and conventional construction methods in Hong Kong. *Sci Rep* [Internet]. 1 de diciembre de 2024 [citado 11 de septiembre de 2025];14(1):1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73906-7>
12. Al-Obaidy M, Courard L, Attia S. A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint: A Case Study Inspired by Circularity Principles. *Sustainability (Switzerland)* [Internet]. 1 de marzo de 2022 [citado 11 de septiembre de 2025];14(6):3370. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14063370>

13. Minunno R, O'grady T, Morrison GM, Gruner RL. Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments. 2021 [citado 11 de septiembre de 2025]; Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110935>
14. Huang Z, Zhou H, Miao Z, Tang H, Lin B, Zhuang W. Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions. Engineering [Internet]. 1 de abril de 2024 [citado 11 de septiembre de 2025];35:115-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019>
15. Kanafani K, Magnes J, Lindhard SM, Balouktsi M. Carbon Emissions during the Building Construction Phase: A Comprehensive Case Study of Construction Sites in Denmark. Sustainability 2023, Vol 15, Page 10992 [Internet]. 13 de julio de 2023 [citado 11 de septiembre de 2025];15(14):10992. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su151410992>
16. Wei J, Liu S, Guo H, Wang H, Wang J. Comparative analysis of embodied carbon in modular and conventional buildings. Buildings [Internet]. 2024;14(8):1866. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/buildings14081866>
17. Amarasinghe I, Jayasinghe P, Alahakoon C. Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector: A critical review. Clean Technol Environ Policy [Internet]. 2024;26:4359-77. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03023-6>
18. Análisis del ciclo de vida y emisiones de carbono en tres alternativas de sistemas constructivos para un proyecto de edificios para viviendas multifamiliares [Internet]. [citado 25 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/4598/2756>