

RESEARCH ARTICLE

Recopilación Bibliográfica del impacto ambiental de diferentes materiales de construcción andina: Hormigón, Acero, Madera y Adobe.

Idrovo-Ureña, Diego Fernando ¹  Jefferson Torres-Quezada ^{2*} 

¹ Universidad Católica de Cuenca. Unidad Académica de Posgrado. Maestría en Construcciones con mención en Administración de la Construcción Sustentable.

² Universidad Católica de Cuenca, Unidad Académica de Posgrado. Maestría en Construcciones con mención en Administración de la Construcción Sustentable.

✉ Correspondencia: dfidrovou62@est.ucacue.edu.ec 📞 + 593 999 057 661

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj81205>

Resumen: El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto ambiental de los materiales de construcción (hormigón (convencional, prefabricado y con aditivos ecológicos), acero, madera y adobe) mediante la recolección y análisis de estudios previos relacionados al estudio. Se seleccionaron estos materiales por su relevancia y alta demanda en proyectos constructivos, buscando identificar opciones más sostenibles. La recolección bibliográfica evaluó las emisiones de CO₂ y el consumo de energía promedio en cada caso. Los resultados muestran que el acero es el material con mayor impacto ambiental, con emisiones promedio de 2.62 kg CO₂/kg y un consumo energético de 33.5 MJ/kg. El hormigón presenta un impacto moderado, con emisiones de 0.15 kg CO₂/kg y consumo energético de 1.5 MJ/kg. En contraste, el adobe y la madera destacan como los materiales más sostenibles, con emisiones de 0.024 kg CO₂/kg y 0.35 kg CO₂/kg, respectivamente, y consumos energéticos de 0.3 MJ/kg (adobe) y 3.0 MJ/kg (madera). En conclusión, la optimización en el uso de materiales como el hormigón prefabricado con aditivos ecológicos y el acero reciclado es clave para reducir el impacto ambiental de la construcción, alineándose con los objetivos de sostenibilidad global.

Palabras claves: Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), impacto ambiental, eficiencia energética, materiales de construcción, sostenibilidad.

Bibliographic compilation of the environmental impact of different Andean construction materials: Concrete, Steel, Wood and Adobe

Abstract: The objective of this research was to evaluate the environmental impact of construction materials (concrete (conventional, prefabricated and with ecological additives), steel, wood and adobe) through the collection and analysis of previous studies related to the study. These materials were selected for their relevance

Green World Journal /Vol 08/Issue 01/2025/ January-April 2025 / www.greenworldjournal.com



Cita: Diego Fernando, I.-U., & Orres-Quezada, J. T. (2025). Recopilación Bibliográfica del impacto ambiental de diferentes materiales de construcción andina: Hormigón, Acero, Madera y Adobe. Green World Journal, 8(1), 205. <https://doi.org/10.53313/gwj81205>

Received: 01/April/2025

Accepted: 18/April/2025

Published: 19/April/2025

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2025 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

RESEARCH ARTICLE

and high demand in construction projects, seeking to identify more sustainable options. The bibliographic collection evaluated CO₂ emissions and average energy consumption in each case. The results show that steel is the material with the highest environmental impact, with average emissions of 2.62 kg CO₂/kg and energy consumption of 33.5 MJ/kg. Concrete presents a moderate impact, with emissions of 0.15 kg CO₂/kg and energy consumption of 1.5 MJ/kg. In contrast, adobe and wood stand out as the most sustainable materials, with emissions of 0.024 kg CO₂/kg and 0.35 kg CO₂/kg, respectively, and energy consumptions of 0.3 MJ/kg (adobe) and 3.0 MJ/kg (wood). In conclusion, optimization in the use of materials such as precast concrete with ecological additives and recycled steel is key to reduce the environmental impact of construction, aligning with global sustainability goals.

Key words: Life Cycle Assessment (LCA), environmental impact, energy efficiency, building materials, sustainability.

1. Introducción

El impacto ambiental de la industria de la construcción se ha convertido en un tema de gran relevancia a nivel global y Ecuador no es la excepción. El uso de materiales como hormigón, acero, madera y adobe en la construcción es un factor crítico en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en el consumo energético. En Ecuador, el sector de la construcción ha mostrado un crecimiento constante, lo que ha incrementado su contribución al cambio climático debido al uso intensivo de materiales como el hormigón y el acero, ambos con altas emisiones de CO₂ durante su producción ¹²

El hormigón, siendo uno de los materiales más comunes en la construcción, es conocido por su impacto ambiental significativo. La producción de cemento, su componente principal, es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO₂, una cifra alarmante considerando que el proceso de fabricación es altamente intensivo en energía ³. En Ecuador, la industria del cemento ha sido identificada como una de las principales fuentes de emisiones de GEI, lo que ha llevado a un creciente interés por encontrar alternativas más sostenibles ¹. Por otro lado, el acero, aunque menos utilizado que el hormigón en algunas áreas, también genera un impacto ambiental considerable. La producción de acero en Ecuador, al igual que en otros países, involucra procesos que requieren grandes cantidades de energía y emiten contaminantes nocivos, incluidos GEI ². Estudios recientes han destacado la necesidad de mejorar la eficiencia energética en las plantas siderúrgicas ecuatorianas para mitigar estos impactos ⁴.

En Ecuador, el impacto ambiental de la madera depende en gran medida de las prácticas de manejo forestal. La tala ilegal y la deforestación siguen siendo problemas significativos que, si no se gestionan correctamente, pueden disminuir los beneficios ambientales del uso de la madera en la construcción ⁵.

El adobe, un material tradicional en la construcción rural de Ecuador, destaca por su bajo impacto ambiental en la etapa de producción. Este material, hecho de tierra cruda, tiene una huella de carbono mínima comparada con el hormigón y el acero. Sin embargo, su uso también presenta desafíos, como la durabilidad limitada y la necesidad de mantenimiento frecuente, que pueden aumentar su impacto ambiental a lo largo del tiempo ⁶. Además, su capacidad para aislar térmicamente es inferior a la de otros materiales, lo que podría llevar a un mayor consumo de energía en climas extremos ⁷. La relevancia de estudiar el impacto ambiental de estos materiales en Ecuador radica en la urgencia de desarrollar estrategias que minimicen las emisiones de GEI y

el consumo de energía en la construcción, un sector vital para el desarrollo económico del país. La literatura existente ha abordado de manera fragmentada el impacto de estos materiales, con estudios que analizan individualmente el hormigón ¹, el acero ², la madera ⁸, y el adobe ⁶. Sin embargo, aún es necesario realizar un análisis que considere las particularidades del contexto ecuatoriano, ya que los estudios actuales no abordan de manera completa los factores clave para evaluar el impacto ambiental de los materiales de construcción. Este artículo tiene como objetivo llenar este vacío en la literatura, proporcionando una evaluación comparativa del impacto ambiental de hormigón, acero, madera y adobe, con un enfoque en Ecuador. Se analizarán las etapas críticas del ciclo de vida que contribuyen al impacto ambiental, lo que permitirá identificar estrategias de mitigación efectivas.

Este estudio no solo aportará conocimientos valiosos para la comunidad científica, sino que también ofrecerá recomendaciones prácticas para los actores del sector de la construcción en Ecuador. La pregunta de investigación principal es: ¿Cuál es el impacto ambiental de los materiales de construcción más utilizados en Ecuador, específicamente el hormigón, acero, madera y adobe, en términos de emisiones de GEI y consumo de energía?

La estructura del artículo se desarrollará en las siguientes secciones: primero, se presentará el marco metodológico y los datos utilizados; luego, se mostrarán los resultados de la revisión bibliográfica y el análisis comparativo; y finalmente, se discutirán las implicaciones de estos resultados y se ofrecerán recomendaciones para mejorar la sostenibilidad de la construcción en Ecuador. Los objetivos específicos incluyen: (1) identificar las emisiones de CO₂ y el consumo energético de cada material reportados en la literatura revisada; (2) considerando los estudios previos, se identificará que material contribuye en mayor impacto a al ambiente; (3) evaluar la sostenibilidad de cada material considerando sus características reportadas en la bibliografía; y (4) proponer estrategias basadas en la evidencia bibliográfica para reducir el impacto ambiental en la construcción en el país.

2. Metodología

La metodología de esta investigación se estructurará en cuatro fases principales, cuyo objetivo es evaluar y comparar el impacto ambiental de diferentes materiales de construcción: hormigón convencional, prefabricado y con aditivos ecológicos, acero, madera y adobe. Para este propósito, se recopilarán y analizarán datos disponibles en la literatura científica y bases de datos especializadas, que permitirá cuantificar los impactos de cada material en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y consumo energético en todas las etapas de su ciclo de vida. A continuación, se describe cada fase en detalle.

2.1. Fase 1: Recolección y Estandarización de Datos para Evaluación del Ciclo de Vida (LCA)

En esta primera fase, el proceso se centrará en la recopilación y estandarización de datos ambientales relevantes para cada material de construcción. Los materiales seleccionados (hormigón, acero, madera y adobe) serán evaluados desde la producción hasta la disposición final. Los datos incluirán indicadores clave, como las emisiones de CO₂ y el consumo de energía, necesarios para establecer un inventario ambiental detallado. Este inventario servirá como base para las evaluaciones que se realizarán en las fases siguientes.

La recolección de datos incluirá la extracción de información específica de estudios previos, bases de datos ambientales y estadísticas industriales. En particular, se pondrá especial atención al

hormigón, analizando variantes como el hormigón prefabricado y el hormigón con aditivos ecológicos, los datos de la tabla 1 continua en la siguiente página.

Tabla 1. Artículos analizados

Título del Artículo	Autor(es)	Año	Datos Obtenidos
Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a RMBA	Córdoba et al.	2024	Hormigón: Producción anual de 2.6 millones m ³ en RMBA; emisiones de CO ₂ de 919.957 t; consumo energético de 4.156.815 GJ; uso de 8,49 Mt de materia prima. Incluye variantes de hormigón prefabricado y con aditivos ecológicos que disminuyen el impacto de carbono.
Analyzing the environmental impact of conventional wooden and modern reinforced concrete systems	Keles et al.	2024	Hormigón (RC): Alta energía embebida (hasta 3000 MJ/m ²) en sistemas con aislamiento XPS/EPS; emisiones de CO ₂ de 300–330 kgCO ₂ -eq/m ² . Madera: Energía embebida baja en sistemas tradicionales (~500–750 MJ/m ²), con emisiones de CO ₂ de 50–100 kgCO ₂ -eq/m ² en sistemas de adobe y madera.
Embodied energy and embodied carbon of structural building materials	Cabeza et al.	2021	Hormigón: Energía embebida entre 0.78–1 MJ/kg y carbono embebido de 0.10–0.16 kgCO ₂ /kg. Acero: Energía embebida elevada de 32–35 MJ/kg y carbono embebido de 2.53–2.71 kgCO ₂ /kg. Madera: Energía embebida de 3 MJ/kg; carbono embebido de 0.30–0.40 kgCO ₂ /kg. Adobe: Energía embebida de 0.45 MJ/kg para bloques de adobe.
Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks	Christoforou et al.	2016	Adobe: Energía embebida varía según método de producción: on-site con paja local 51.03 MJ/m ³ (0.033 MJ/kg), off-site con paja transportada 261.74 MJ/m ³ (0.17 MJ/kg), on-site con aserrín transportado 51.88 MJ/m ³ (0.033 MJ/kg), y off-site con aserrín

			transportado 264.73 MJ/m ³ (0.169 MJ/kg).
Recent work in embodied energy analysis of New Zealand building materials	Alcorn	1998	Adobe: Energía embebida para adobe en diferentes formas: bloque 0.47 MJ/kg, estabilizado con cemento 0.42 MJ/kg, adobe bituminoso 0.29 MJ/kg, tierra apisonada con cemento 0.50 MJ/kg, y bloque prensado 0.42 MJ/kg. Sin datos específicos de carbono embebido, aunque valores de referencia de técnicas de tierra indican de 0.023–0.025 kg CO ₂ /kg.
Embodied energy and carbon in construction materials 9	Hammond et al.	2008	Hormigón: Energía embebida de 0.95 MJ/kg y carbono embebido de 0.035 kgCO ₂ /kg. La tabla continua en la siguiente página Acero: Energía embebida de 24.4–35.3 MJ/kg y carbono embebido de 0.482–0.749 kgCO ₂ /kg. Madera: Energía embebida de 7.4–15 MJ/kg y carbono embebido de 0.123–0.221 kgCO ₂ /kg.
Assessment of building materials in the construction sector: A case study using life cycle assessment ¹⁰	Dsilva et al.	2023	Hormigón: emisiones reducidas de 680 a 500 kgCO ₂ /m ² de área construida.
Methodologies for assessing building embodied carbon in a circular economy perspective ¹¹	Li & Masera	2024	Acero: Emisiones negativas por reciclaje de -183.86 kgCO ₂ /m ² . Concreto: Baja tasa de reciclaje con un promedio de -2.39 kgCO ₂ /m ² .

Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry ¹²	Asdrubali et al.	2023	Hormigón: Energía embebida promedio 1.32 MJ/kg, carbono embebido 0.137 kgCO ₂ eq/kg. Adobe: Energía embebida 0.033–0.17 MJ/kg, carbono embebido 0.0017–0.0129 kgCO ₂ eq/kg.
Carbon assessment of a wooden single-family building ¹³	Petrović et al.	2023	Madera: Emisiones GHG de hasta -3.5 kgCO ₂ e/m ² /año en la etapa de producción; emisiones totales de referencia para el diseño mejorado (cradle to grave) de -0.7 kgCO ₂ e/m ² /año. CLT y materiales de madera se destacaron por su capacidad de almacenamiento de carbono.
Evaluating the Impact of Material Service Life on Embodied Energy of Residential Villas in UAE ¹⁴	Rauf et al.	2024	Hormigón: 2.404 GJ/m ³ en estructuras de cimentación. La tabla continua en la siguiente página
A Building Life-Cycle Embodied Performance Index—The Relationship between Embodied Energy, Embodied Carbon, and Environmental Impact ¹⁵	Hu	2020	Hormigón: Contribuye al 51 % del carbono embebido; energía embebida de 1.84–3.90 MJ/kg.
A Review of Embodied Energy (EM) Analysis of Industrialised Building System (IBS) ¹⁶	Zaini et al.	2016	Hormigón: Energía embebida de 1.84–3.90 MJ/kg
Environmental Impact Assessment of Building Materials Using Life Cycle Assessment ¹⁷	Ghanbari	2023	Hormigón: Energía embebida de 1.11 MJ/kg, emisiones de CO ₂ de 1.14 kgCO ₂ /kg. Acero: Energía embebida de 24.34 MJ/kg, emisiones de CO ₂ de 1.53 kgCO ₂ /kg.

Evaluación ambiental basada en el análisis del ciclo de vida (ACV) en la fase de construcción de una edificación en Cataluña ¹⁸	Ortiz et al.	2010	Acero: emisiones de CO ₂ : 54.9 kg CO ₂ -eq/m ² ; energía total: 1,260 MJ/m ² . Hormigón prefabricado: 88.9 kg/m ² ; emisiones de CO ₂ : 16.9 kg CO ₂ -eq/m ² ; energía total: 165 MJ/m ² .
Life Cycle Assessment of Construction Materials: A Sustainable Development Approach ¹⁹	Souvik et al.	2022	Acero: Energía embebida de 35.4 MJ/kg (virgen), 25.3 MJ/kg (39% reciclado); carbono embebido de 2.89 kg CO ₂ /kg (virgen), 1.95 kg CO ₂ /kg (reciclado). La tabla continua en la siguiente página
Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden ²⁰	Petrovic et al.	2019	Hormigón: Energía embebida de 268.68 MJ/m ³ ; emisiones de CO ₂ de 6.10 toneladas en la construcción de 21.8 m ³ . Madera: Energía embebida de 514.03 MJ/m ³ ; emisiones de CO ₂ de 9.10 toneladas en 4.4 m ³ .
Advancing the circular economy and environmental sustainability with timber hybrid construction in South Korean public building ²¹	Shin & Kim	2024	Usando LCA (Evaluación del Ciclo de Vida) y BCI (Indicadores de Circularidad de Edificios). El uso de madera redujo el impacto ambiental en -13.5 %, -11.5 % y -5.0 % según su aplicación (estructura, sin núcleo, pared exterior).
Environmental Assessment of Calcium Sulfoaluminate Cement: A Monte Carlo Simulation in an Industrial Symbiosis Framework ²²	Tangler-Bayramtan et al.	2024	El cemento mejorado con elementos sostenibles (CSA) reduce el consumo energético en 13–16 % y las emisiones de CO ₂ en 35–48 % frente al cemento Portland, utilizando materias primas alternativas bajo un enfoque de simbiosis industrial
Assessing the environmental impact of construction waste management in northern Thailand: An	Ubolsook et al.	2024	El concreto genera 38.624 kgCO ₂ eq/m ² , 12.991 MJ/m ² y 420.97 THB/m ² en costos.

approach to estimate greenhouse gas emissions and cumulative energy demand ²³	Con materiales reciclados, las emisiones se reducen en 20.3 %, la energía en 90.5 % y los costos en 20.9 % frente al caso convencional
--	--

2.2. Fase 2: Evaluación del Ciclo de Vida en trabajos previos para la Cuantificación de Impactos Ambientales

La segunda fase de la metodología se enfoca en evaluar los datos recolectados en los estudios previos, para identificar los impactos ambientales de los materiales de construcción seleccionados: hormigón (convencional, prefabricado y con aditivos ecológicos), acero, madera y adobe. Esta fase está diseñada para cumplir con los objetivos de la investigación, proporcionando una evaluación detallada de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de energía asociado a cada material a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida. La implementación de este análisis facilitará la identificación de los materiales que presentan el menor impacto ambiental, estableciendo un marco propio para evaluar proyectos de construcción sostenible que prioricen la reducción de emisiones y la conservación energética.

2.2.1. Revisión de indicadores de impacto ambiental

En este trabajo, se verificó la información sobre los materiales seleccionados: hormigón, acero, madera y adobe. Los datos recopilados permitieron evaluar indicadores como energía embebida, emisiones de CO₂ y eficiencia en el uso de recursos.

Para el hormigón, se analizaron datos relacionados con su consumo energético y emisiones durante su ciclo de vida. En el caso del acero, se revisaron sus altos niveles de energía embebida en comparación con otros materiales, mientras que la madera mostró ventajas asociadas con el secuestro de carbono. Por último, para el adobe, se evaluaron métodos de producción y transporte, registrando valores de 0.033 MJ/kg en producción local y 0.17 MJ/kg con transporte, según datos existentes (Christoforou et al., 2016).

Esta verificación proporciona una base para identificar oportunidades de mejora ambiental en el uso de estos materiales y optimizar su aplicación en proyectos constructivos.

2.2.2. Identificación de Puntos Críticos y Comparación de Impacto Ambiental

El análisis de trabajos previos respecto al LCA permitirá identificar los puntos críticos de impacto ambiental para cada material en términos de consumo energético y emisiones de GEI en las diferentes etapas de su ciclo de vida. En el caso del acero, se ha demostrado que su alta energía embebida (32–35 MJ/kg) y carbono embebido (2.53–2.71 kgCO₂/kg) representan una contribución significativa al impacto ambiental total en comparación con materiales como la madera y el adobe, que presentan menores valores de energía y carbono embebido (Cabeza et al., 2021; Alcorn, 1998). De igual manera, el impacto del aislamiento térmico se analizará en profundidad, considerando los materiales de alto carbono embebido como el XPS y EPS, que, si bien mejoran la eficiencia térmica, presentan altos valores de carbono (Keles et al., 2024).

Hormigón

- El análisis se centrará en evaluar las emisiones de CO₂ y el consumo energético asociados con la producción de hormigón, considerando datos específicos sobre el impacto del cemento como componente principal. Este enfoque permitirá identificar las etapas clave del ciclo de vida del material que generan mayores impactos ambientales.

Acero

- El análisis se enfocará en evaluar los altos niveles de energía embebida y carbono asociado en la producción de acero, considerando datos clave de su ciclo de vida. Este enfoque permitirá identificar los procesos de mayor impacto ambiental, como la fundición y el laminado, para optimizar el uso del material en aplicaciones constructivas.

Madera

- El análisis se centrará en evaluar el carbono embebido y el potencial de secuestro de carbono de la madera durante su ciclo de vida. Este enfoque permitirá identificar los beneficios ambientales y las etapas críticas en el uso de este material en construcciones sostenibles.

Adobe y Materiales de Tierra

- El análisis se centrará en evaluar la energía embebida y el carbono asociado a los diferentes métodos de producción del adobe y otros materiales de tierra. Se considerarán escenarios de producción local y transporte, identificando los procesos que generen menores impactos ambientales. Este enfoque permitirá determinar las mejores prácticas para el uso eficiente de estos materiales en construcciones sostenibles.

2.3. Fase 3: Comparación y Análisis de Resultados

En esta fase, se realizará una comparación detallada de los impactos ambientales de los materiales seleccionados (hormigón, acero, madera y adobe) utilizando los datos obtenidos y estandarizados en las fases anteriores. Se emplearán métricas como emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ equivalente) y consumo energético total para evaluar el desempeño de cada material. Además, se identificarán las etapas del ciclo de vida con mayor contribución al impacto ambiental, permitiendo destacar oportunidades de mejora para cada material.

2.4. Fase 4: Elaboración de Recomendaciones para una Construcción Sostenible

Con base en los resultados obtenidos, se desarrollarán recomendaciones dirigidas a reducir el impacto ambiental de los materiales evaluados. Estas recomendaciones estarán orientadas a la selección de materiales, optimización de procesos constructivos y promoción de prácticas sostenibles. También se planteará un marco preliminar para la implementación de estrategias de diseño y construcción más sostenibles, destacando el potencial de cada material en contextos específicos.

3. Resultados

A continuación, se muestra la tabla 2 con los materiales analizados, derivados de los distintos artículos, junto con sus valores de emisión de CO₂ y energía incorporada.

Tabla 2. Impacto ambiental de cada variante de los materiales analizados

Material y Variante	Emisiones de CO ₂ (kg CO ₂ /kg)	Consumo de Energético (MJ/kg)	Energía incorporada (MJ/m ³)	Fuente
Hormigón (convencional)	0.137	1.11	268.68	Petrovic et al., 2019
Hormigón (prefabricado)	0.169	1.32	-	Ortiz et al., 2010
Hormigón (general)	0.1	0.95	-	Hammond & Jones, 2008
Hormigón (cradle to grave)	0.035	-	-	Asdrubali et al., 2023
Acero (virgen)	2.89	35.4	-	Souvik et al., 2022
Acero (reciclado)	1.95	25.3	-	Souvik et al., 2022
Madera (general)	0.4	15	514.03	Petrovic et al., 2019
Madera (CLT)	-0.7	-	-	Petrovic et al., 2023
Adobe (bloque prensado)	0.42	0.5	-	Alcorn, 1998
Adobe (on-site con paja local)	0.033	0.033	51.03	Christoforou et al., 2016
Adobe (on-site con paja transportada)	0.169	0.17	261.74	Christoforou et al., 2016
Adobe (con estabilización de cemento)	0.023	0.42	-	Alcorn, 1998
Adobe (bituminoso)	0.025	0.29	-	Alcorn, 1998

La tabla presenta un análisis detallado de las emisiones de CO₂, el consumo energético y la energía incorporada para diversos materiales y variantes utilizados en la construcción. En ella, se incluyen datos cuantitativos provenientes de estudios científicos que evalúan el impacto ambiental mediante metodologías estandarizadas de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Se destacan materiales como el hormigón, el acero, la madera y el adobe, con sus respectivas variantes. En el caso del hormigón, se observa una variación en sus emisiones de CO₂ y consumo energético dependiendo de su tipo, como el convencional, prefabricado y en análisis de ciclo completo ("cradle to grave"). Por otro lado, el acero presenta valores significativamente más altos de energía embebida y emisiones de CO₂, diferenciándose entre la producción virgen y el reciclaje. La madera se analiza tanto en su forma general como en sistemas constructivos de CLT, mostrando ventajas en términos de secuestro de carbono. Finalmente, el adobe se detalla en varias configuraciones, desde métodos

locales hasta estabilizados con cemento, evidenciando diferencias en energía embebida según las condiciones de producción.

Hormigón

El hormigón, dependiendo de su variante, presenta diferentes valores de emisiones de CO₂ y consumo energético. Para el hormigón convencional, las emisiones de CO₂ se estiman en 0.137 kg CO₂/kg, con un consumo energético de 1.11 MJ/kg y una energía incorporada de 268.68 MJ/m³ (Petrovic et al., 2019). El hormigón prefabricado muestra un ligero incremento en las emisiones, alcanzando 0.169 kg CO₂/kg y un consumo energético de 1.32 MJ/kg (Ortiz et al., 2010). Por otro lado, el hormigón en términos generales tiene emisiones de 0.1 kg CO₂/kg y un consumo energético de 0.95 MJ/kg (Hammond & Jones, 2008). Finalmente, un análisis "cradle to grave" revela emisiones de 0.035 kg CO₂/kg (Asdrubali et al., 2023).

Estos valores reflejan el impacto ambiental acumulado debido a la alta demanda de este material en la construcción. La etapa de producción del cemento y el transporte se identifican como factores clave para reducir sus impactos ambientales.

Acero

El acero se caracteriza por ser uno de los materiales con mayor impacto ambiental. Las emisiones de CO₂ asociadas a su producción varían entre 2.89 kg CO₂/kg para el acero virgen y 1.95 kg CO₂/kg para el acero reciclado, según Souvik et al. (2022). En términos de consumo energético, el acero virgen requiere 35.4 MJ/kg, mientras que el reciclado disminuye este valor a 25.3 MJ/kg. El alto impacto del acero se debe a la intensidad energética de los procesos de fundición y laminado, lo que lo convierte en un material crítico en proyectos de construcción donde se utiliza en grandes cantidades. Aunque el reciclaje representa una alternativa menos intensiva en energía, su efectividad depende de la eficiencia de los sistemas de recuperación y reciclaje en la industria, lo que plantea desafíos operativos importantes.

Madera

La madera, especialmente en construcciones tradicionales, se presenta como una opción de menor impacto ambiental en comparación con otros materiales. Según Petrovic et al. (2019), las emisiones de CO₂ para la madera general son de 0.4 kg CO₂/kg, con un consumo energético de 15 MJ/kg y una energía incorporada de 514.03 MJ/m³. En sistemas constructivos como CLT (Cross Laminated Timber), la madera incluso muestra emisiones negativas de -0.7 kg CO₂/kg, destacando su capacidad de almacenamiento de carbono (Petrovic et al., 2023).

Estas propiedades hacen de la madera una alternativa sostenible, especialmente para estructuras de baja densidad. Sin embargo, su impacto ambiental puede variar dependiendo del tratamiento aplicado, ya que procesos como el secado en hornos o el uso de madera laminada tienden a incrementar el consumo energético, lo que debe considerarse al implementarla en construcciones sostenibles.

Adobe

El adobe, especialmente en variantes locales, destaca por su bajo impacto ambiental. Según Christoforou et al. (2016), el adobe producido in situ con paja local presenta un consumo energético

de 0.033 MJ/kg y una energía incorporada de 51.03 MJ/m³, con emisiones de CO₂ de 0.023 kg CO₂/kg. Por otro lado, variantes como el adobe estabilizado alcanzan un consumo energético de 0.42 MJ/kg (Alcorn, 1998). A pesar de las diferencias en producción, el adobe sigue siendo una opción más eficiente en carbono y energía en comparación con materiales como el acero o el hormigón armado.

Emisiones Promedio

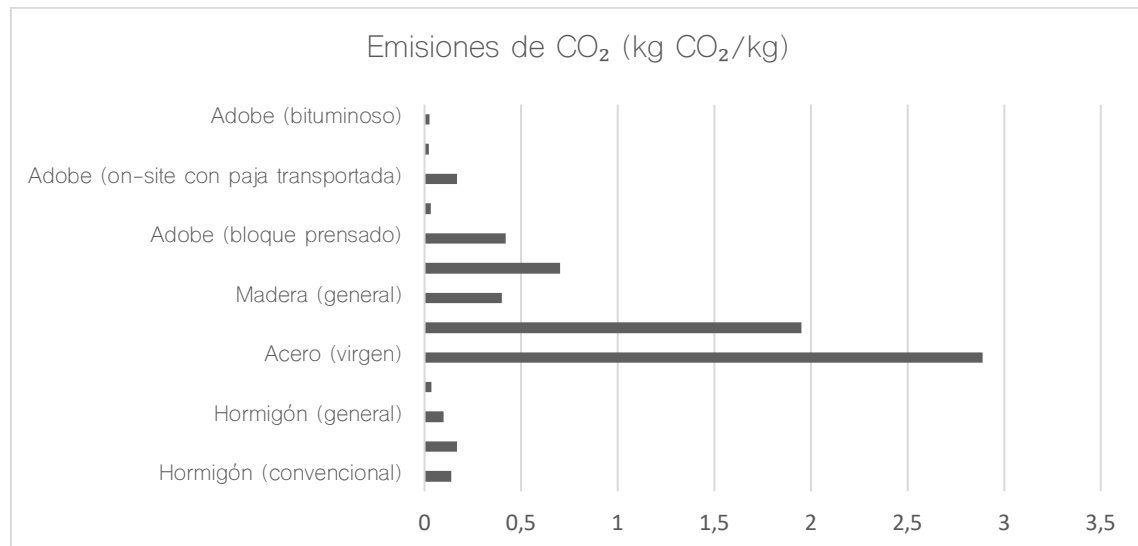


Figura 1. Emisiones de CO₂ de los materiales

Al analizar las emisiones de CO₂, el adobe y adobe con agregados se destaca como el material con menor impacto ambiental, con un promedio de 0.024 kg CO₂/kg. Este valor refleja la baja intensidad de carbono asociada al uso de materiales naturales y locales, como la tierra y la paja, en la producción de adobe. Su método de producción, especialmente cuando se realiza en el sitio de construcción, minimiza tanto el consumo energético como las emisiones, haciéndolo una opción sostenible y de bajo impacto.

La madera, con emisiones promedio de 0.35 kg CO₂/kg, también presenta un bajo impacto ambiental en comparación con materiales convencionales. Su capacidad de almacenar carbono durante su ciclo de vida contribuye a reducir su huella de carbono. No obstante, los procesos de tratamiento y secado pueden incrementar sus emisiones en algunos casos, lo cual debe considerarse al seleccionar madera para construcción sostenible.

El hormigón, con emisiones promedio de 0.15 kg CO₂/kg, presenta un impacto moderado en términos de emisiones de CO₂. Aunque su producción es menos intensiva en carbono que la del acero, el uso extensivo de cemento contribuye significativamente a sus emisiones, especialmente en su variante armada. La utilización de aditivos ecológicos y agregados reciclados puede mejorar su perfil ambiental, pero aún representa un reto en proyectos de alta demanda.

Por último, el acero se identifica como el material con el mayor impacto ambiental, con emisiones promedio de 2.62 kg CO₂/kg, debido al proceso de producción intensivo en carbono y energía. Su uso genera hasta diez veces más emisiones de CO₂ que materiales como el adobe, lo cual posiciona al acero como una opción menos favorable para proyectos con objetivos de sostenibilidad, salvo en casos donde se priorice el uso de acero reciclado para reducir este impacto.

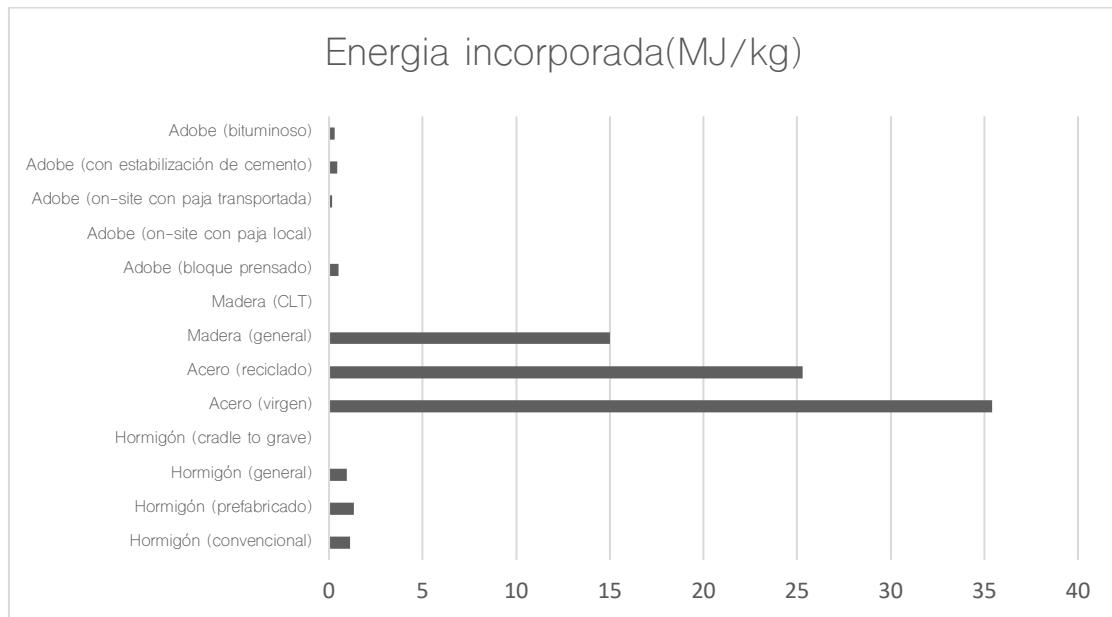


Figura 2. Energía incorporada de los materiales

Los valores del hormigón se calcularon considerando tanto el hormigón convencional como el armado, incluyendo datos de la energía incorporada entre 0.78 y 2.5 MJ/kg y emisiones de CO₂ de 0.10 a 0.24 kg CO₂/kg. En el caso del acero, el valor promedio es más alto debido a su proceso de producción intensivo en energía, con un rango de 32–35 MJ/kg y emisiones de 2.53 a 2.71 kg CO₂/kg.

Por otro lado, los valores de la madera incluyen variaciones de construcciones tradicionales y madera laminada, lo cual eleva ligeramente en la energía incorporada promedio debido a procesos como el secado en hornos. Y Finalmente, con valores de energía embebida muy bajos (0.033–0.47 MJ/kg) y emisiones de CO₂ entre 0.023 y 0.025 kg CO₂/kg, el adobe se posiciona como el material de menor impacto ambiental.

Basándonos en el la energía incorporada promedio, el adobe surge como el material con la mayor eficiencia energética, con un gasto de solo 0.3 MJ/kg. Este bajo consumo se debe a su composición de materiales naturales y al uso de técnicas de producción en sitio que minimizan el transporte y el procesamiento intensivo. Por ello, el adobe es una opción altamente eficiente y sostenible, especialmente en construcciones locales donde se pueden utilizar recursos disponibles en el lugar.

La madera, con un consumo de 3.0 MJ/kg, también muestra una eficiencia energética favorable en comparación con materiales más industrializados. Aunque su proceso de tratamiento y secado puede incrementar la energía incorporada, su capacidad para almacenar carbono y la relativa facilidad de producción la posicionan como una alternativa de bajo impacto en proyectos sostenibles.

El hormigón consume en 1.5 MJ/kg, situándose en un nivel de eficiencia moderado. Aunque su producción requiere un considerable gasto energético, en particular para la fabricación del cemento, variantes de hormigón prefabricado o con aditivos reciclados pueden optimizar su perfil de eficiencia. Este consumo moderado de energía convierte al hormigón en una opción viable cuando se buscan materiales de bajo impacto moderado.

El acero es el material con el mayor la energía incorporada, de 33.5 MJ/kg, debido al proceso intensivo de fundición y moldeado. A pesar de que el acero reciclado puede reducir en cierta medida este consumo, su demanda energética sigue siendo significativamente mayor que la de otros materiales de construcción. Esto lo posiciona como el material menos eficiente en términos de energía y lo hace menos adecuado para proyectos con objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad.

4. Discusión

El análisis LCA realizado para hormigón, acero, madera y adobe permitió identificar y comparar sus impactos ambientales en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la energía incorporada, cumpliendo así con los objetivos de la investigación. La evaluación de estos materiales en distintas variantes, incluyendo hormigón convencional, prefabricado y con aditivos ecológicos, destaca diferencias significativas en su huella de carbono y eficiencia energética, proporcionando una base cuantitativa para la selección de materiales más sostenibles en la industria de la construcción.

4.1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

El acero se identifica como el material de construcción con mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según Souvik et al. (2022), el acero virgen genera emisiones de 2.89 kg CO₂/kg, mientras que el acero reciclado reduce estas emisiones a 1.95 kg CO₂/kg, aunque siguen siendo elevadas en comparación con otros materiales. Este impacto está relacionado con la alta demanda energética de los procesos de fundición y laminado.

La transición hacia el uso de acero reciclado representa una alternativa más sostenible, aunque su eficiencia depende de la implementación de sistemas de reciclaje efectivos en la industria. Estos datos resaltan la importancia de optimizar los procesos productivos para mitigar el impacto ambiental del acero en la construcción.

Por otro lado, el hormigón, con un promedio de emisiones de 0.15 kg CO₂/kg, representa un impacto moderado. Si bien su producción y el uso de cemento Portland contribuyen considerablemente a las emisiones, las variantes de hormigón prefabricado y con aditivos ecológicos, como se observó en el estudio de Córdoba et al. (2024), presentan una mejora relativa en términos de emisiones debido al uso de agregados reciclados y materiales que reducen el consumo de cemento. Sin embargo, el hormigón sigue siendo una fuente relevante de GEI y debería usarse con cautela en proyectos orientados hacia la sostenibilidad.

La madera y el adobe se posicionan como las alternativas de construcción más sostenibles en cuanto a emisiones de CO₂. La madera, con un promedio de 0.35 kg CO₂/kg, destaca por su capacidad de almacenar carbono durante su ciclo de vida, un factor que potencialmente puede reducir aún más su huella de carbono, especialmente en proyectos que consideren el uso de madera certificada y producida de manera sostenible (Keles et al., 2024). El adobe demostró tener el menor impacto en emisiones de CO₂, con valores promedio de 0.024 kg CO₂/kg, debido a que su producción requiere poco procesamiento y aprovecha materiales naturales y locales (Christoforou et al., 2016). Esta baja huella de carbono hace que el adobe sea especialmente adecuado para construcciones de bajo impacto ambiental, especialmente en contextos locales donde es posible minimizar la distancia de transporte y la necesidad de materiales adicionales.

4.2. La energía incorporada

El adobe destaca como el material más eficiente, con un consumo de 0.033 MJ/kg en producción local, optimizando el uso de energía y recursos disponibles en sitio (Christoforou et al., 2016; Alcorn, 1998). La madera, con un consumo promedio de 3.0 MJ/kg, es favorable en términos energéticos, aunque procesos como el secado pueden aumentar su impacto (Cabeza et al., 2021).

El hormigón presenta un consumo energético moderado de 1.5 MJ/kg, con mejoras en variantes prefabricadas o con aditivos reciclados (Córdoba et al., 2024). Por último, el acero tiene el mayor consumo energético, alcanzando 33.5 MJ/kg, reducido en un 70% con acero reciclado, aunque sigue siendo menos eficiente que otros materiales (Cabeza et al., 2021).

4.3. Evaluación de Impactos Energéticos

La energía incorporada y las emisiones de CO₂ son factores clave para evaluar la sostenibilidad de los materiales de construcción. El acero tiene el mayor consumo energético, con 33.5 MJ/kg, debido a procesos intensivos de fundición y laminado, lo que lo convierte en una opción menos eficiente en términos de sostenibilidad (Cabeza et al., 2021). Sin embargo, el reciclaje puede reducir este valor en un 70%, aunque sigue siendo elevado frente a otros materiales.

El hormigón, con una energía incorporada promedio de 1.5 MJ/kg, presenta un impacto más moderado, aunque sigue siendo menos eficiente que la madera y el adobe. Su principal área de impacto es la producción de cemento, que consume altos niveles de energía. Alternativas como el uso de agregados reciclados han mostrado potencial para reducir tanto la energía como las emisiones de CO₂ (Córdoba et al., 2024).

La madera, con 3.0 MJ/kg, y el adobe, con apenas 0.033 MJ/kg, destacan por su bajo consumo energético. Aunque la madera puede incrementar su impacto con tratamientos como el secado en hornos, sigue siendo una opción eficiente frente al hormigón y el acero. El adobe, por su parte, sobresale como el material de menor demanda energética, gracias a su producción local y al uso de recursos naturales, minimizando el transporte y el procesamiento (Christoforou et al., 2016).

4.4. Identificación de Mejores Prácticas en Producción y Uso de Materiales

La mejora de la eficiencia energética en la construcción depende de la implementación de prácticas sostenibles tanto en la producción como en el uso de materiales. A partir del análisis, se identifican varias mejores prácticas que pueden optimizar el perfil ambiental de cada material:

Hormigón Prefabricado y con Aditivos Ecológicos: La producción de hormigón prefabricado reduce la necesidad de mezcla en el sitio de construcción, lo que disminuye el consumo de energía y la generación de residuos. Además, el uso de aditivos ecológicos, como la ceniza volante y la escoria de alto horno, permite reducir la cantidad de cemento Portland necesario, que es la fuente principal de impacto en el hormigón (Córdoba et al., 2024). La adopción de estas prácticas podría mejorar significativamente la eficiencia energética del hormigón, haciéndolo una opción más viable para proyectos sostenibles.

Reciclaje de Acero: Aunque el acero es intensivo en energía, su reciclaje puede reducir la energía incorporada hasta en un 70% (Cabeza et al., 2021). Invertir en sistemas de recuperación y reciclaje en la industria permite reaprovechar el acero sin necesidad de someterlo a los procesos iniciales de fundición. Además, el acero reciclado mantiene las propiedades estructurales necesarias para aplicaciones de alta resistencia, lo cual permite que su uso en construcciones sea más sostenible sin comprometer la calidad.

Madera Certificada y Tratamiento en Sitio: La madera presenta una ventaja significativa debido a su capacidad para almacenar carbono, lo que puede reducir la huella de carbono general del proyecto. Para maximizar su eficiencia, se recomienda utilizar madera certificada proveniente de fuentes sostenibles. Además, minimizar el tratamiento en hornos industriales y optar por tratamientos naturales o secado en sitio puede reducir considerablemente la energía incorporada en el proceso de preparación de la madera, haciéndola una opción aún más favorable para proyectos sostenibles (Keles et al., 2024).

Producción Local de Adobe: La práctica de producir adobe en el sitio de construcción es una de las mejores maneras de optimizar su eficiencia energética. La disponibilidad de tierra local y la incorporación de materiales naturales, como paja o aserrín, permiten reducir tanto la energía incorporada como las emisiones de CO₂ asociadas al transporte. Además, el uso de técnicas de producción que no requieran estabilización con cemento, como el adobe sin cocer, presenta una opción de bajo impacto en comparación con variantes más industrializadas (Christoforou et al., 2016; Alcorn, 1998).

4.5. Criterios para la Selección de Materiales Basados en Impacto Ambiental y Eficiencia Energética

Para asegurar la selección de materiales que contribuyan a la sostenibilidad en la construcción, se proponen los siguientes criterios, que priorizan tanto el menor impacto ambiental (en términos de emisiones de CO₂) como la mayor eficiencia energética (la energía incorporada mínimo). Estos criterios ayudarán a orientar las decisiones en la elección de materiales en proyectos de construcción con objetivos ambientales claros.

4.5.1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (CO₂)

Materiales con Baja Emisión de CO₂: Se debe seleccionar preferentemente materiales con emisiones de CO₂ inferiores a 0.1 kg CO₂/kg. Este umbral asegura que los materiales contribuyan mínimamente al cambio climático en términos de huella de carbono. Los materiales que cumplen con este criterio incluyen el adobe y algunas variantes de madera no tratada.

Uso de Materiales con Potencial de Captura de Carbono: La madera, al almacenar carbono durante su ciclo de vida, puede reducir la huella de carbono neta de una construcción. Se deben priorizar materiales que ofrecen almacenamiento de carbono, siempre que sean de fuentes certificadas y sostenibles.

4.5.2. La energía incorporada (Eficiencia Energética)

Materiales con La energía incorporada Bajo (≤ 1 MJ/kg): La eficiencia energética debe considerarse mediante la selección de materiales con la energía incorporada promedio igual o menor a 1 MJ/kg. Este valor asegura un bajo consumo de recursos energéticos durante el ciclo

de vida del material. El adobe y ciertas aplicaciones de madera cumplen con este criterio, mientras que el acero y el hormigón presentan consumos energéticos mayores.

Uso de Materiales Locales y Producción In Situ: La selección de materiales disponibles en el sitio de construcción reduce significativamente las necesidades de transporte y el consumo de energía asociado. Los materiales naturales, como el adobe, deben ser preferidos cuando se puedan producir in situ utilizando recursos locales.

4.5.3. Durabilidad y Mantenimiento de Ciclo de Vida

Materiales de Alta Durabilidad y Bajos Requerimientos de Mantenimiento: Se deben preferir materiales que, además de ser sostenibles, requieran poco mantenimiento o reemplazo durante su ciclo de vida, ya que esto reduce el consumo de energía a largo plazo. La madera tratada adecuadamente y el hormigón prefabricado son opciones que cumplen este criterio en términos de resistencia y bajo mantenimiento.

Materiales Reciclables o de Economía Circular: Es recomendable seleccionar materiales que se puedan recuperar y reciclar al final de su vida útil. El acero reciclado y los componentes prefabricados de hormigón representan opciones adecuadas para maximizar la circularidad de los materiales y reducir su impacto a largo plazo.

4.5.4. Impacto Ambiental General en la Producción

Uso de Materiales con Proceso de Producción de Bajo Impacto: Materiales cuya producción genere emisiones y la energía incorporada mínimo deben ser preferidos. Se debe priorizar el uso de adobe y madera sin tratamiento intensivo. En el caso del hormigón, variantes con aditivos reciclados como la ceniza volante y escoria de alto horno son preferibles, dado que reducen el impacto ambiental al reducir la dependencia de cemento Portland.

Evitación de Materiales con Procesos Altamente Intensivos en Energía: Materiales como el acero deben ser minimizados en aplicaciones que no exijan alta resistencia estructural, dado su alto impacto energético. Cuando el acero sea necesario, se debe priorizar el uso de acero reciclado.

Basado en estos hallazgos y criterios de selección definidos, a continuación, se muestra una tabla indicando los materiales que son más adecuados para reducir el impacto ambiental en distintos contextos de construcción:

Tabla 3. Materiales recomendados según el contexto e impacto ambiental

Contexto de Construcción	Material Más Adecuado	Razón	Notas Adicionales
Construcción Local y en Sitios Rurales	Adobe	Baja emisión de CO ₂ (0.024 kg CO ₂ /kg) y bajo consumo energético (0.3 MJ/kg). Producción en sitio con materiales locales reduce el transporte y el consumo de energía.	Ideal para proyectos que buscan un impacto ambiental mínimo y pueden aprovechar materiales naturales disponibles en el lugar.

Proyectos Urbanos de Mediana Escala	Hormigón prefabricado con aditivos ecológicos	Emisiones moderadas (0.15 kg CO ₂ /kg) y consumo de energía moderado (1.5 MJ/kg). Los aditivos reciclados mejoran su perfil ambiental.	Adecuado cuando se necesita resistencia estructural, y permite reducir el uso de cemento Portland a través de materiales reciclados como ceniza volante.
Edificaciones con Enfoque en Economía Circular	Acero reciclado	Reciclabilidad y durabilidad altas. Aunque el consumo energético es elevado (10 MJ/kg reciclado), el impacto se reduce al evitar la producción primaria.	Recomendado en aplicaciones donde se requiere alta resistencia estructural y se puede establecer un sistema de reciclaje eficiente al final de la vida útil.
Construcción Sostenible en Climas Fríos	Madera	Emisión de CO ₂ moderada (0.35 kg CO ₂ /kg) y bajo consumo energético (3 MJ/kg). Actúa como aislante natural y almacena carbono, reduciendo la huella total.	La madera certificada y sin tratamientos intensivos es la opción preferente. Adecuada en proyectos de baja altura con requerimientos de aislamiento térmico. La tabla continua en la siguiente página
Proyectos de Construcción Modular o Prefabricada	Hormigón prefabricado	Emisiones moderadas y menor consumo energético al evitar mezcla en sitio. Facilidad de transporte y montaje eficiente en proyectos modulares.	Adecuado para edificaciones de mediana y alta resistencia estructural, como módulos de vivienda o pequeñas edificaciones prefabricadas.
Construcción en Zonas de Alta Sísmicidad	Madera o Hormigón prefabricado	La madera ofrece flexibilidad y resistencia en zonas sísmicas. El hormigón prefabricado proporciona estabilidad estructural.	La madera laminada (GLT o CLT) es preferible en edificaciones que requieren flexibilidad, mientras que el hormigón prefabricado se usa en estructuras más rígidas.
Construcción de Edificios Industriales o de Gran Altura	Acero reciclado	Alta durabilidad y reciclabilidad, aunque tiene un alto consumo energético. Ideal para grandes estructuras que necesitan alta resistencia y durabilidad.	El acero reciclado es esencial para disminuir el impacto ambiental, pero aún se deben considerar prácticas de minimización del uso de acero en el diseño.
Proyectos de Construcción Ecológica o Sostenible	Adobe y Madera	Ambos materiales tienen bajo consumo de energía y bajas emisiones de CO ₂ . Son ideales para proyectos que priorizan la sostenibilidad y la integración con el entorno.	Recomendados en edificaciones de bajo impacto ambiental, especialmente en proyectos ecológicos donde se aprovechan los materiales naturales disponibles localmente.

Nota. El adobe es la mejor opción para construcciones locales y proyectos con limitaciones de transporte y recursos energéticos. El hormigón prefabricado con aditivos ecológicos es el más adecuado en proyectos urbanos donde se requiere resistencia estructural, con el beneficio adicional de reducir el uso de cemento. El Acero reciclado, por su lado, es idóneo en estructuras de gran escala donde se necesita alta resistencia, asegurando que los materiales sean reciclables al final de

la vida útil. Y la madera, es excelente elección para construcciones sostenibles y con características de aislamiento, especialmente en climas fríos o zonas sísmicas.

5. Conclusión

La evaluación del impacto ambiental de los materiales de construcción —hormigón convencional, prefabricado y con aditivos ecológicos, acero, madera y adobe— utilizando la metodología de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) permitió identificar variaciones significativas en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y consumo energético. Los resultados muestran que el adobe y la madera presentan el menor impacto ambiental, mientras que el acero es el material con mayor intensidad en términos de consumo energético y emisiones de GEI. La implementación de estrategias que prioricen el uso de materiales de bajo impacto, como el adobe y la madera, y la adopción de variantes más sostenibles, como el hormigón prefabricado con aditivos ecológicos y el acero reciclado, pueden ayudar a la industria de la construcción a reducir su huella de carbono y el consumo de energía de manera significativa, alineándose así con los objetivos de sostenibilidad globales.

La cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero realizada mediante LCA permitió identificar los materiales con menor y mayor impacto en términos de CO₂. El adobe se destaca como el material con menor emisión de CO₂, con un promedio de 0.024 kg CO₂/kg, seguido por la madera con 0.35 kg CO₂/kg, lo que los convierte en opciones altamente sostenibles en construcciones de bajo impacto ambiental. En contraste, el acero demostró ser el material con el mayor nivel de emisiones de CO₂, alcanzando un promedio de 2.62 kg CO₂/kg debido a su proceso de producción intensivo en energía. Estas conclusiones cuantitativas indican que, para proyectos orientados a reducir el impacto de GEI, el adobe y la madera son las opciones preferibles.

El análisis de consumo energético reveló que el adobe es el material con mayor eficiencia energética, con un promedio de 0.3 MJ/kg cuando se produce en sitio con materiales locales. La madera también presenta un consumo moderado de 3.0 MJ/kg, manteniéndose dentro de rangos bajos siempre que se minimicen los tratamientos intensivos. Por otro lado, el hormigón mostró un consumo energético promedio de 1.5 MJ/kg, siendo una opción intermedia en eficiencia. Sin embargo, el acero resultó tener el mayor consumo energético, alcanzando un promedio de 33.5 MJ/kg, lo que confirma su ineficiencia en términos de energía embebida. Estos resultados sugieren que, para maximizar la eficiencia energética, deben priorizarse materiales como el adobe y la madera en proyectos sostenibles, y optimizarse el uso de hormigón prefabricado y acero reciclado cuando sean necesarios en estructuras de alta resistencia.

A partir de los hallazgos del LCA, se desarrolló una tabla de recomendaciones que ofrece criterios específicos para seleccionar materiales de construcción que minimicen el impacto ambiental, adaptándose a distintos contextos. En proyectos de construcción local o rural, el adobe es la opción más adecuada debido a su bajo impacto y facilidad de producción en sitio. En construcciones urbanas de mediana escala, el hormigón prefabricado con aditivos ecológicos resulta favorable por su resistencia y reducción de emisiones en comparación con el hormigón convencional. Para edificaciones de gran altura o industriales, el acero reciclado se posiciona como la opción más sostenible dentro de las alternativas de alta resistencia estructural. Finalmente, en proyectos de construcción sostenible y ecológica, tanto el adobe como la madera son recomendados como las

mejores opciones. Estas recomendaciones permiten seleccionar materiales de acuerdo a las necesidades específicas del proyecto, facilitando la aplicación de estrategias efectivas para reducir el impacto ambiental en la industria de la construcción

Contribución de autores: Conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, curaduría de datos, redacción, revisión y edición, visualización, supervisión y administración del proyecto: Ing. Diego Idrovo-Ureña. Validación y revisión general: Arq. Jefferson Torres-Quezada.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- 1 A. León-Velez and V. Guillén-Mena, *Ambiente Construído*, 2020, **20**, 611–625.
- 2 D. M. Petroche Sánchez, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2021.
- 3 J. L. Provis and J. S. J. Van Deventer, *Springer*.
- 4 M. Fossati, B. Fabiano and E. Palazzi, *Energy efficiency in iron and steel making*, Helsinki, 2021.
- 5 J. G. M. Cantos and M. G. V. Arvelo, *Revista San Gregorio*, 2021, **1**, 197–209.
- 6 J. F. Brito, D. Pino, N. Madeleine and S. Herrera, *DAYA. Diseño, Arte y Arquitectura*, 2021, 59–79.
- 7 M. J. González and J. García Navarro, *Build Environ*, 2006, **41**, 902–909.
- 8 G. Churkina, A. Organschi, C. P. O. Reyer, A. Ruff, K. Vinke, Z. Liu, B. K. Reck, T. E. Graedel and H. J. Schellnhuber, DOI:10.1038/s41893-019-0462-4.
- 9 G. P. Hammond and C. I. Jones, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, 2008, **161**, 87–98.
- 10 J. Dsilva, S. Zarmukhambetova and J. Locke, *Heliyon*, 2023, **9**, e20404.
- 11 Y. Li and G. Masera, *E3S Web of Conferences*, 2024, **546**, 01014.
- 12 F. Asdrubali, G. Grazieschi, M. Roncone, F. Thiebat and C. Carbonaro, *Energies (Basel)*, 2023, **16**, 1846.
- 13 B. Petrović, O. Eriksson and X. Zhang, *Build Environ*, 2023, **233**, 110093.
- 14 A. Rauf, D. E. Attoye and R. H. Crawford, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2024, **31**, 244–270.
- 15 M. Hu, *Energies (Basel)*, 2020, **13**, 1905.
- 16 N. Zaini, S. Ibrahim, A. Baharum and M. Nawi, *J. Mater. Environ.*, 2016, **7**, 1357–1365.
- 17 M. Ghanbari, *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research*, 2023, **6**, 11–22.
- 18 O. Ortiz, J. Pasqualino and F. Castells, *Afinidd LXV*, 2010, **67**, 175–181.
- 19 M. Souvik, K. Saurav and K. Anup, *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2022, **55**, 369–380.
- 20 B. Petrovic, J. A. Myhren, X. Zhang, M. Wallhagen and O. Eriksson, *Energy Procedia*, 2019, **158**, 3547–3552.
- 21 B. Shin and S. Kim, *Build Environ*, 2024, **257**, 111543.
- 22 M. Tanguler-Bayramtan, C. B. Aktas and I. O. Yaman, *Buildings*, 2024, **14**, 3673.
- 23 P. Ubolsook, C. Podong, S. Sedpho and P. Jansanthea, *J Clean Prod*, 2024, **467**, 142961.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>