



Research Article
2026 January - June

Revisión sistemática del ciclo de vida del concreto y acero en vivienda social latinoamericana

Systematic review of concrete and steel life cycle in Latin American social housing

GERMÁN VÉLEZ-TORRES

Universidad Católica de Cuenca, Ecuador
german.velez@ucacue.edu.ec

KARLA ALVARADO PALACIOS

Instituto Superior Tecnológico del Austro, Ecuador
karla.alvarado@instecirg.edu.ec

RESUMEN Este artículo presenta una revisión sistemática del análisis de ciclo de vida (ACV) aplicado al concreto y al acero utilizados en vivienda social en América Latina. A través de una búsqueda en bases como Scopus, ScienceDirect y Web of Science, se identificaron 40 estudios que cumplieron los criterios PRISMA. Se analizan los impactos ambientales, metodologías empleadas y limitaciones comunes. Los resultados indican una alta huella de carbono del concreto y del acero, con variaciones regionales. Se identifican oportunidades de mejora mediante el uso de materiales cementantes suplementarios, acero reciclado y estrategias de diseño circular. Finalmente, se proponen recomendaciones de política pública orientadas a la estandarización del ACV, incentivos económicos y gobernanza de datos. El estudio concluye que existen soluciones técnicamente viables, pero su implementación requiere cambios normativos y financieros.

ABSTRACT This article presents a systematic review of life cycle assessment (LCA) applied to concrete and steel used in social housing in Latin America. A search in Scopus, ScienceDirect and Web of Science yielded 48 studies meeting PRISMA criteria. The analysis includes environmental impacts, applied methodologies, and common limitations. Results show a high carbon footprint for both materials, with regional differences. Improvement opportunities include the use of supplementary cementitious materials, recycled steel, and circular design strategies. Finally, policy recommendations are proposed, focusing on LCA standardization, economic incentives, and data governance. The study concludes that technically feasible solutions exist, but their implementation depends on regulatory and financial changes.

KEYWORDS análisis de ciclo de vida, sostenibilidad, vivienda social, concreto, acero

RESUMEN life cycle assessment, sustainability, social housing, concrete, steel

Recibido: 13/05/2025
Revisado: 29/09/2025
Aceptado: 08/10/2025
Publicado: 26/01/2026



Cómo citar este artículo/How to cite this article: Vélez-Torres, G. y Alvarado Palacios, K. (2025). Revisión sistemática del ciclo de vida del concreto y acero en vivienda social latinoamericana. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 15(29), 27-38. <https://doi.org/10.18537/est.v015.n029.a02>

1. Introducción

El sector de la construcción es ampliamente reconocido como uno de los principales responsables del consumo de recursos naturales y generación de impactos ambientales a nivel mundial. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, este sector representa aproximadamente el 40% del consumo energético global, el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y genera más del 30% de los residuos sólidos urbanos (United Nations Environment Programme [UNEP], 2020). En América Latina, y particularmente en Ecuador, estas cifras se ven agravadas por el acelerado crecimiento urbano y el déficit habitacional, estimado en más de 400.000 unidades a nivel nacional (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI], 2024).

Ante este panorama, la necesidad de incorporar principios de sostenibilidad en el ámbito de la vivienda social es urgente, especialmente debido a su carácter masivo, su impacto acumulado y su rol clave en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la sostenibilidad de materiales y procesos constructivos. Permite identificar impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto (ISO 14044:2006). Esta metodología facilita comparaciones entre soluciones convencionales y sostenibles, apoyando la toma de decisiones informadas tanto en el diseño arquitectónico como en políticas públicas.

En el contexto de la vivienda social, el concreto y el acero emergen como los materiales más relevantes por su uso extendido y su elevada huella ambiental. La producción de cemento, componente fundamental del concreto, es responsable de cerca del 8% de las emisiones globales de CO₂, debido principalmente al proceso de calcinación del clínker y al uso de combustibles fósiles (Scrivener et al., 2017). Por su parte, la fabricación del acero representa entre el 7% y el 9% de las emisiones globales de GEI, dependiendo de la tecnología utilizada (Kim et al., 2022).

Diversos estudios han documentado estrategias eficaces para mitigar los impactos ambientales asociados a estos materiales. En el caso del concreto, se ha evaluado la sustitución parcial del cemento con subproductos industriales como cenizas volantes, escoria de alto horno, metacaolín o puzolana natural, lo que puede reducir el GWP hasta en un 40% (Marinković et al., 2017; Guo et al., 2023; Mushtaq et al., 2022). Adicionalmente, la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) como agregados reciclados permite disminuir la demanda de recursos vírgenes y reducir impactos como el agotamiento abiótico (Silva et al., 2023; Vázquez-Rowe et al., 2019).

En cuanto al acero, las mejoras se concentran en la utilización de materiales reciclados mediante tecnologías de horno de arco eléctrico alimentadas por fuentes renovables, lo cual permite una reducción superior al 70% en emisiones GEI frente a la producción primaria (García-Gusano et al., 2015). De forma complementaria, se han explorado alternativas como la reutilización de componentes estructurales, el diseño para desmontaje y el uso de uniones en seco, que además de reducir la huella de carbono, facilitan el cierre del ciclo de vida de los materiales (Küpfer et al., 2022).

La aplicación de estas estrategias se enmarca dentro del paradigma de la economía circular en el sector de la construcción, promoviendo la reutilización de materiales, el diseño modular y la valorización de residuos. Estudios recientes confirman que estas prácticas reducen impactos en categorías como acidificación, eutrofización, toxicidad humana y demanda energética acumulada (Hossain et al., 2020; Zabalza Bribián et al., 2009).

No obstante, su implementación masiva en América Latina enfrenta múltiples barreras. Entre ellas, la escasa disponibilidad de bases de datos ambientales regionalizadas, la falta de normativas técnicas específicas que promuevan materiales sostenibles, y una limitada articulación entre el sector académico, productivo y estatal (Rondón Toro et al., 2016). En Ecuador, en particular, estas limitaciones han impedido la integración sistemática del ACV en procesos de planificación y licenciamiento de vivienda social.

Frente a este contexto, el presente artículo tiene como objetivo desarrollar una revisión bibliográfica sistemática y crítica sobre la sostenibilidad ambiental del concreto y el acero en proyectos de vivienda social, con énfasis en estudios que apliquen el ACV como herramienta metodológica principal. Se consideran tanto estudios de caso en América Latina como investigaciones relevantes en otras regiones, particularmente Estados Unidos, con el fin de comparar enfoques y resultados. Esta revisión prioriza investigaciones publicadas entre los años 2000 y 2024 en las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Web of Science, aplicando criterios de selección rigurosos en cuanto a metodología, calidad de datos y pertinencia temática.

El artículo se organiza en cuatro secciones principales: primero, se presenta la metodología utilizada para la revisión sistemática, abarcando los criterios de inclusión y análisis. Luego, se exponen los principales hallazgos de los estudios seleccionados, diferenciando resultados por material, región y estrategia tecnológica. Posteriormente, se analizan las implicaciones técnicas y de política pública de estos hallazgos en el contexto latinoamericano y ecuatoriano. Finalmente, se proponen recomendaciones concretas para promover prácticas constructivas más sostenibles en el desarrollo de vivienda social.

2. Materiales y métodos

Este estudio se desarrolla como una revisión bibliográfica sistemática orientada a analizar el desempeño ambiental de los materiales más representativos en la construcción de vivienda social en América Latina y Estados Unidos: el concreto y el acero. La metodología se fundamenta en los lineamientos del enfoque PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), aplicando criterios estrictos de inclusión, exclusión, codificación y comparación de datos para garantizar la transparencia y reproducibilidad del análisis.

2.1. Objetivo del análisis

El objetivo de esta revisión es identificar, comparar y evaluar los resultados obtenidos por estudios que aplican el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al concreto y al acero en contextos de vivienda social. Se busca determinar en qué medida estos materiales, bajo distintos enfoques productivos (convencional vs. alternativo), generan impactos significativos en categorías ambientales clave y qué estrategias han sido implementadas para reducir dichos impactos.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Los estudios seleccionados para la revisión cumplieron con los siguientes criterios de inclusión:

- Ser artículos científicos revisados por pares, publicados entre 2013 y 2024.
- Estar indexados en Scopus, ScienceDirect y Web of Science.
- Aplicar de manera explícita la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo las normas ISO 14040/14044.
- Contener indicadores cuantitativos como GWP (Global Warming Potential), consumo de energía primaria, uso de agua, entre otros.
- Abordar contextos de vivienda social o edificación residencial, en países de América Latina y Estados Unidos.
- Se excluyeron tesis, documentos sin revisión por pares, artículos sin DOI verificable, y aquellos enfocados en materiales no estructurales o fuera del sector construcción.

2.3. Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda avanzada en Scopus, ScienceDirect y Web of Science utilizando los siguientes términos clave combinados con operadores booleanos:

("life cycle assessment" OR "LCA") AND ("concrete" OR "steel") AND ("residential buildings" OR "social housing") AND ("Latin America" OR "South America" OR "United States").

La búsqueda se limitó a artículos en inglés, español y portugués. Se recuperaron inicialmente 78 artículos, de los cuales 40 cumplieron con todos los criterios de inclusión tras revisión completa del texto.

2.4. Protocolo de análisis

Los estudios seleccionados fueron codificados en una base de datos Excel mediante las siguientes variables:

- Año de publicación
- País de estudio
- Material analizado (concreto/acero)
- Unidad funcional utilizada (kg, m³, m²)
- Enfoque del ACV (cradle-to-gate, cradle-to-grave, gate-to-gate)
- Base de datos de inventario utilizada (Ecoinvent, GaBi, etc.)
- Método de evaluación (CML, ReCiPe, TRACI, etc.)
- Indicadores reportados (GWP, energía, agua, etc.)
- Distancia de transporte considerada
- Inclusión de políticas públicas
- Conclusiones generales.

Adicionalmente, se evaluó la robustez metodológica de los estudios mediante una matriz de verificación basada en los criterios PRISMA y las normas ISO 14040/14044. Los artículos se clasificaron en tres niveles: alta, media y baja calidad metodológica, considerando la claridad de la unidad funcional, la exhaustividad del alcance (*cradle-to-gate* vs. *cradle-to-grave*), la fuente de datos empleada (bases primarias vs. genéricas) y la transparencia en la presentación de resultados. Esta clasificación permite ponderar el peso de cada estudio dentro del análisis crítico.

2.5. Análisis cuantitativo con OpenLCA

Para contextualizar los hallazgos de la literatura, se replicaron dos escenarios de ACV mediante el software OpenLCA, con base de datos Ecoinvent v3.7, centrados en el concreto (premezclado vs. reciclado) y acero (virgen vs. reutilizado al 100%). La unidad funcional fue 1 kg de material. El alcance fue de tipo *cradle-to-grave*, incluyendo etapas de producción, transporte, uso y fin de vida. El método de evaluación de impactos fue CML baseline, considerando las siguientes categorías:

- Potencial de calentamiento global (GWP)
- Acidificación (AP)
- Eutrofización (EP)
- Formación de ozono fotoquímico (POCP)
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP).

2.6. Validación de resultados

Los resultados obtenidos en OpenLCA fueron contrastados con los de la revisión sistemática mediante análisis cruzado, identificando coincidencias en términos de reducciones de impacto en escenarios sostenibles y validando la robustez de los enfoques empleados en estudios regionales. Se priorizó la comparabilidad de datos al normalizar las unidades de análisis y expresar los resultados en porcentajes de reducción relativa.

3. Resultados y Discusión

3.1. Sobre el impacto climático (GWP) del concreto y acero

El análisis del ciclo de vida (ACV) aplicado a los materiales predominantes en vivienda social —concreto y acero— revela patrones consistentes en los impactos ambientales a lo largo de las etapas A1-A3, es decir, desde la extracción de materias

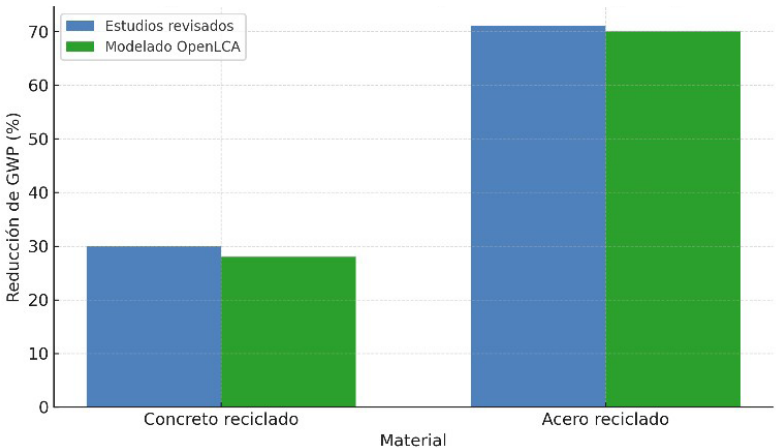


Figura 1: Comparación de la reducción del impacto climático (GWP) en concreto y acero reciclado. (2025)

Autor/año	País	Material	Unidad funcional	Alcance ACV	Base de datos	Método	Categorías analizadas	Hallazgo principal
Gámez-García et al. (2019)	México	Concreto y acero	Vivienda 42 m ² , 50 años	A1-C4	Ecoinvent 3.1 + base nacional	IPCC 2013, CML 2001	GWP, CED, HTP, ADP	70-90% de emisiones en fase de producción; 17 tCO ₂ e/ciclo de vida
De Lara y Penteado (2024)	Brasil	Concreto	Vivienda social unifamiliar	A1-C4	Ecoinvent	CML baseline	GWP, AP, EP, ODP	Producción aporta 90% del impacto; prevención no siempre reduce huella
Bianchi et al. (2021)	Brasil	Concreto y acero	Vivienda de interés social	A1-A3	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, CED	Optimización de diseño reduce impactos en 15%
Caldas et al. (2017)	Brasil	LSF vs. albañilería	Vivienda típica	A1-C	Ecoinvent	CML 2001	GWP	Light steel framing reduce 20% GWP frente a mampostería
Tello-Ayala et al. (2023)	Ecuador	Concreto vs. bahareque	Vivienda unifamiliar	A1-A5	Ecoinvent 3.6	ReCiPe	GWP, CED	Bahareque 70% menos CO ₂ que concreto armado
Contreras et al. (2016)	Brasil	Concreto reciclado	1 m ³ de concreto	A1-A3	Ecoinvent	CML	GWP	RCD reciclados reducen 30% GWP
Córdoba et al. (2023)	Argentina	Concreto	1 m ³ de concreto	A1-A3	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, ADP	Optimización de mezclas reduce 32% emisiones
Colorado et al. (2022)	Colombia	RCD	1 t de residuos	C1-C4	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, AP, EP	Reuso de RCD reduce demanda de recursos y GEI
Maués et al. (2021)	Brasil (Amazonía)	Residuos construcción	Proceso de disposición	Transporte y disposición	Ecoinvent	ReCiPe	GWP	Transporte + disposición representan 15% del impacto
Salzer et al. (2017)	Filipinas*	Concreto y bambú	Vivienda social típica	A1-C	Impact2002+	Impact2002+	17 categorías	Bambú y bloques de tierra-cemento reducen hasta 83% GWP

Tabla 1. Estudios representativos de ACV en concreto y aceros aplicados a vivienda social. (2025)

Nota: 1. Se incluye Filipinas como referencia comparativa de países en desarrollo fuera de América Latina, dado que aborda vivienda social en clima tropical y permite contrastar estrategias con la región. 2. Alcances ACV: A1-A3 (producción), A4-A5 (transporte y construcción), B (uso/mantenimiento), C (fin de vida). 3. Bases de datos: la mayoría de los estudios latinoamericanos emplean Ecoinvent, en algunos casos complementada con inventarios locales

primas hasta la producción. Esta sección compara cuantitativamente los resultados obtenidos mediante modelado en OpenLCA y los hallazgos de 40 artículos científicos verificados, centrando el análisis en el potencial de calentamiento global (GWP), el consumo energético y el uso de recursos hídricos.

En el modelado propio, desarrollado con la base de datos Ecoinvent v3.7 y el método CML baseline, se observó que la sustitución parcial del cemento por subproductos industriales en el concreto permitió una reducción del GWP de hasta 28%, mientras que la reutilización estructural del acero redujo este indicador en un 70%. Estos resultados coinciden con los valores promedio reportados en la literatura académica revisada, donde se documentaron reducciones de 30% para concreto reciclado y 71% para acero reciclado (Figura 1).

Los resultados de la modelación en OpenLCA se contrastaron con los hallazgos de la literatura revisada. Para facilitar la comparación entre contextos y metodologías, la Tabla 1 resume los estudios más representativos sobre ACV de concreto y acero en vivienda social, destacando unidad funcional, alcance, bases de datos, métodos y hallazgos clave.

Los estudios regionales muestran que la mejora ambiental del concreto depende en gran medida del nivel de sustitución del cemento y de la calidad de

los materiales alternativos. Por ejemplo, Contreras et al. (2016) reportaron una reducción del 30% en el GWP utilizando residuos de construcción en Brasil, mientras que Córdoba et al. (2023) en Argentina obtuvieron una disminución del 32% mediante optimización de mezclas. En Ecuador, Jiménez y Freire (2024) mostraron que la incorporación de cenizas volcánicas permitió reducir el consumo de cemento en un 40% sin comprometer el desempeño estructural.

Respecto al acero, los resultados coinciden en que el mayor impacto ambiental se encuentra en la fase de producción. Sin embargo, al implementar estrategias de reutilización y reciclaje estructural, reportan una mejora del 65% al 75% en el GWP (García et al., 2015; Küpfer et al., 2022), además de reducciones similares en el consumo de energía no renovable. En todos los casos, se destaca que estas mejoras son más significativas en países con matrices energéticas más limpias (García et al., 2015; Gámez-García et al., 2019; Küpfer et al., 2022), como Ecuador, donde la participación hidroeléctrica supera el 80% (Petroche et al., 2022).

Desde el punto de vista metodológico, una limitación detectada en los artículos revisados es la falta de estandarización en la unidad funcional. Algunos estudios utilizan 1 kg o 1 m³ de material como base, mientras otros emplean áreas construidas o viviendas completas. En este estudio,

se normalizó la comparación por kg de material para garantizar consistencia entre los resultados modelados y los extraídos de la literatura.

Asimismo, menos del 40% de los estudios evaluaron el ciclo completo del material (*cradle-to-grave*). La mayoría aplicó un enfoque *cradle-to-gate*, lo que limita el análisis del impacto de las etapas de uso y disposición final. El presente estudio abordó esta limitación incorporando el ciclo completo, revelando que el potencial de mejora ambiental en las fases finales es considerable, particularmente en escenarios de recuperación y reutilización estructural.

Finalmente, la vinculación de los resultados del ACV con propuestas de política pública fue abordada solo por una minoría de los artículos revisados. Sin embargo, entre aquellos que sí lo hicieron, destacan las recomendaciones de incluir el ACV como criterio obligatorio en licitaciones públicas (Küpfer et al., 2022) y la promoción de incentivos fiscales para materiales con menor impacto ambiental (Jiménez y Freire, 2024). Estos aportes resultan esenciales para el diseño de una normativa técnica y fiscal orientada hacia la sostenibilidad del sector de la construcción, especialmente en el marco del desarrollo de vivienda social en América Latina.

Los estudios recientes señalan que la construcción de viviendas sociales genera cargas ambientales significativas, principalmente vinculadas al uso de concreto (cemento y agregados) y acero (Gámez-García et al., 2019; De Lara y Penteado, 2024; Tello-Ayala et al., 2023; Caldas et al., 2017; Colorado et al., 2022; Bianchi et al., 2021; Maués et al., 2021). Por ejemplo, un caso mexicano halló que una vivienda de interés social típica (42 m², 50 años de vida) emite aproximadamente 17 t CO₂e a lo largo de su ciclo de vida (Gámez-García et al., 2019). El 70–90% de estas emisiones proviene de la fase de producción de materiales (cemento, acero, etc.), mientras que las etapas de construcción, uso y fin de vida aportan el resto (Gámez-García et al., 2019). En todos los estudios analizados, los productos finales (cemento, acero, acabados, ventanas) concentran la mayoría del impacto; por ejemplo, el estudio mexicano reporta que las etapas A1–A3 generan el 85% del potencial de calentamiento global (GWP). A pesar de esa coherencia en los insumos críticos, los trabajos difieren sustancialmente en metodología: unidad funcional, alcance del ACV, bases de datos y categorías de impacto empleadas (De Lara y Penteado, 2024; Caldas et al., 2017; Bianchi et al., 2021; Colorado et al., 2022; Maués et al., 2021).

3.2. Metodologías comparadas

En cuanto a la unidad funcional, los estudios latinoamericanos suelen adoptar como referencia la vivienda completa o una superficie habitable típica. En Brasil se consideró una casa unifamiliar de interés social (aunque sin cuantificar en área), mientras que en otros contextos se han usado casos equivalentes, como el análisis de 25 años de vida útil en estudios desarrollados en Filipinas (Salzer et al., 2017). En general, estas unidades permiten comparar alternativas constructivas manteniendo requisitos funcionales equivalentes, como resistencia estructural y aislamiento térmico (Gámez-García et al., 2019).

El alcance del ACV varía entre estudios: muchos trabajos latinoamericanos siguen las directrices de la norma EN 15978 o ISO 21931, incluyendo al menos las fases A (producción y construcción), y en algunos casos también las fases B (uso y mantenimiento) y C (fin de vida). Por ejemplo, el análisis mexicano incluyó las fases A1–A3 (extracción y fabricación), A4–A5 (transporte y construcción), B2 y B4 (mantenimiento y reposición), así como C1, C2 y C4 (demolición, transporte y disposición final). Este enfoque de “cuna a tumba” confirmó que las etapas de producto (A1–A3) concentran más del 70% del impacto en todas las categorías evaluadas (Gámez-García et al., 2019). En el caso brasileño, el modelo abarcó la producción de materiales y procesos constructivos básicos, además de comparar distintos escenarios (bloques cerámicos, muros de hormigón in situ y optimización de diseño), incorporando la gestión de residuos. Se observó que la etapa de extracción y fabricación aportó cerca del 90% del impacto total, mientras que el manejo de escombros generó menos del 1% (De Lara y Penteado, 2024).

En contraste, la mayoría de los estudios en contextos anglosajones (Estados Unidos y Canadá) se concentran en la fase A1–A3, debido a la dificultad metodológica para modelar las fases de uso y fin de vida de los edificios. Aunque no se identificaron estudios específicos de vivienda social para Estados Unidos indexados en Scopus, ScienceDirect y Web of Science, informes técnicos del Departamento de Energía de ese país coinciden en que la producción de materiales como concreto, acero o vidrio es la principal fuente de emisiones embebidas (U.S. Department of Energy [DOE], 2024). De hecho, la guía del DOE clasifica las emisiones del ciclo de vida en fases A a D, señalando a las etapas A1–A3 como el foco principal para estrategias de mitigación (DOE, 2024). En general, los estudios latinoamericanos tienden a abarcar un alcance más amplio (incluso hasta la demolición), mientras que los análisis norteamericanos se enfocan principalmente en la producción, aunque ambos coinciden en identificar esta fase como la más crítica.

Respecto a las bases de datos y herramientas empleadas, los estudios realizados en México y Brasil combinan inventarios globales como Ecoinvent con información local. En México, por ejemplo, se utilizó la base de datos nacional CYPE para estimar consumos de materiales, junto con Ecoinvent 3.1 para procesos genéricos (CYPE, 2017). Aunque Ecoinvent fue originalmente desarrollado con datos europeos (suizos) (Ecoinvent Centre, 2014), su aplicación se ha adaptado progresivamente al contexto latinoamericano y es considerada válida en ausencia de bases locales robustas. En Brasil, al igual que en otros países emergentes, se adoptan enfoques similares, ajustando bases como ICE (Reino Unido) o Ecoinvent a las condiciones locales. Esta situación ha sido señalada como una de las principales limitaciones en el desarrollo de ACV regionales, lo que ha motivado llamados a consolidar inventarios ambientales propios en América Latina (CADIS, 2019). En Estados Unidos, por su parte, se emplea con frecuencia la base USLCI de la EPA o herramientas comerciales como Athena o BEES, aunque estas no siempre son de acceso abierto ni están adecuadamente documentadas en literatura científica.

Las categorías de impacto estudiadas difieren en su alcance. Casi todos los estudios incluyen el cambio climático (huella de carbono, GWP) como categoría prioritaria, dada su relevancia global; muchos además agregan indicadores como la demanda energética incorporada (CED) y el agotamiento de recursos abióticos (ADP), mientras que otros incorporan toxicidad humana (HTP), acidificación (AP) o eutrofización (EP). Por ejemplo, el estudio mexicano empleó los métodos IPCC 2013 para GWP y CED, así como CML 2001 para evaluar HTP y ADP (Gómez-García et al., 2019). El caso brasileño, por su parte, utilizó el método CML para múltiples

categorías como GWP, AP, EP, ODP, formación de ozono fotoquímico (POF) y agotamiento abiótico, siguiendo las directrices de la norma EN 15978 (De Lara y Penteado, 2024). En el contexto asiático, el estudio realizado en Filipinas evaluó GWP, CED y hasta 17 categorías de impacto ambiental utilizando el método midpoint Impact2002+ (Salzer et al., 2017). En síntesis, mientras que las metodologías en América Latina tienden a abordar una gama amplia de categorías ambientales, muchas evaluaciones en Estados Unidos y Europa se centran principalmente en GWP y energía, influenciadas por normativas como LEED y ASHRAE que priorizan el carbono incorporado.

Un aspecto crítico identificado es la representatividad de los inventarios de datos. La mayoría de los estudios latinoamericanos se apoyan en bases globales como Ecoinvent, desarrolladas originalmente con información europea. Aunque su uso ha sido validado en ausencia de inventarios regionales, esta dependencia introduce incertidumbre en la validez de los resultados, ya que los factores de emisión de procesos productivos y matrices energéticas difieren entre regiones. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como aproximaciones comparativas más que como valores absolutos, lo cual influye directamente en la confiabilidad de decisiones de política pública basadas en ACV en la región.

3.3. Resultados y estrategias de reducción

Pese a las diferencias metodológicas, los hallazgos muestran tendencias comunes. En todos los estudios revisados, el hormigón (cemento + agregados) y el acero aparecen como los insumos con mayor impacto ambiental. Por ejemplo, el estudio brasileño identificó que los materiales más críticos fueron el concreto, el cemento y el acero en los escenarios estándar (De Lara y Penteado, 2024). El estudio mexicano también señaló al concreto estructural y al acero de refuerzo como las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, así como de otros impactos ambientales (Gómez-García et al., 2019). En cuanto a magnitudes absolutas, la vivienda de referencia mexicana emitió aproximadamente $17 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ en las etapas A–C del ciclo de vida, equivalentes a $309 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^2$ en la etapa de producción (A1–A5) (Gómez-García et al., 2019). Aunque no se dispone de cifras directas para vivienda social en Estados Unidos, las emisiones estimadas en construcciones residenciales promedio oscilan en rangos comparables.

Los pasos del ciclo de vida con mayor contribución coinciden entre estudios: principalmente la fase de producción de materiales (A1–A3). En el análisis mexicano, estas etapas representaron entre el 78% y el 85% del impacto, dependiendo de la categoría evaluada (GWP, ADP/CED, HTP) (Gómez-García

et al., 2019). De manera similar, el estudio brasileño reportó que la fase de extracción y fabricación representó cerca del 90% del impacto total, mientras que las etapas de transporte y montaje (A4–A5) aportaron menos del 10% cada una, y el fin de vida (C) entre 1% y 3% (De Lara y Penteado, 2024). Esto confirma que la estrategia más eficaz consiste en intervenir sobre los insumos y procesos de la fase de producto.

Con base en estos hallazgos, varios estudios han implementado estrategias de mitigación basadas en modificaciones de materiales y diseño. En Brasil, se compararon dos escenarios: uno preventivo (PS1), que optimizaba cantidades, y otro con muros de concreto vaciado (PS2), frente al caso base con block cerámico. El primero redujo apenas un 5% los impactos, mientras que el segundo lo incrementó en un 15% debido al mayor uso de concreto (De Lara y Penteado, 2024). Esto sugiere que reducir los escombros no garantiza una menor huella si se incrementa el volumen de materiales de alta carga ambiental.

En México, se evaluaron seis alternativas constructivas que variaban muros y ventanas. Las versiones con materiales ligeros y aislantes obtuvieron mejores resultados ambientales frente a la construcción tradicional. Específicamente, el uso de bloques de hormigón con puzolana ligera y ventanas de PVC o madera (en lugar de aluminio) permitió reducir emisiones (Gámez-García et al., 2019). El análisis reveló que el cambio a ventanas de aluminio incrementó la contribución al impacto por toxicidad humana (HTP) de un 11–12% a un 19%, debido a la alta huella ambiental del aluminio. Las mejores combinaciones fueron aquellas con muros aligerados y ventanas de materiales con baja carga ambiental. En general, los autores concluyen que la optimización del concreto en muros mejora el desempeño ambiental siempre que los sustitutos (como la puzolana) tengan una huella inferior al agregado convencional.

En otros contextos latinoamericanos también se han propuesto soluciones basadas en materiales locales o naturales. Por ejemplo, un estudio ecuatoriano comparó una estructura convencional de concreto reforzado con otra de bahareque (bambú guadua), concluyendo que esta última presentó aproximadamente un 70% menos de impacto en carbono embebido (Tello-Ayala et al., 2023). De forma similar, estudios realizados en Filipinas evidenciaron reducciones del GWP de entre 35% y 83% mediante el uso de tecnologías alternativas como estructuras de bambú, bloques de tierra-cemento o paneles a base de coco (Salzer et al., 2017). Estos hallazgos destacan el potencial de los recursos locales para la descarbonización de la vivienda social en climas tropicales y contextos con disponibilidad de mano de obra o cultivos adecuados.

En contraposición, los estudios norteamericanos —aunque centrados en construcción convencional y no específicamente en vivienda social— han enfatizado estrategias como el uso de cementos de bajo carbono (por ejemplo, cemento Portland con escoria o ceniza volante, o cementos LC3 con arcilla calcinada), reciclado de agregados y mejoras en los procesos industriales, incluyendo hornos de alto horno con captura de CO₂ (DOE, 2024). Aunque no se identificaron estudios académicos específicos sobre vivienda social en Estados Unidos en las bases revisadas, las guías técnicas del DOE indican que el empleo de materiales con contenido reciclado y procesos energéticamente eficientes puede reducir considerablemente la huella de carbono del concreto y el acero. Se estima, por ejemplo, que sustituir un 50% del cemento Portland con ceniza volante puede reducir el GWP del concreto en más de un 30% o 40% (DOE, 2024). Estas tecnologías industriales aún no se han incorporado de forma generalizada en estudios sobre vivienda social en América Latina, pero podrían complementarse con estrategias locales como el uso de puzolana o bambú para maximizar los beneficios acumulados.

3.4. Contexto regional y diferencias clave

El contexto regional influye significativamente en la elección y efectividad de las estrategias de sostenibilidad aplicadas a la vivienda social. En América Latina predominan las construcciones con muros de bloque o ladrillo y elementos de concreto armado, y muchas investigaciones han considerado materiales disponibles localmente, como puzolana o guadua (Tello-Ayala et al., 2023). Asimismo, las condiciones climáticas influyen en las decisiones de diseño: por ejemplo, el estudio mexicano seleccionó un contexto de clima cálido, donde la aislación térmica es prioritaria, lo que justifica la preferencia por muros más aislantes (Salzer et al., 2017). En contraste, en muchas regiones de Estados Unidos y Canadá, la vivienda social suele adoptar tipologías multifamiliares con estructuras metálicas o de madera, bajo regulaciones energéticas más estrictas. Sin embargo, estas normativas aún no se han traducido de manera sistemática en investigaciones científicas específicas sobre vivienda social en esas regiones.

Una diferencia adicional relevante se encuentra en la unidad funcional y en la escala de análisis. En América Latina, los estudios se enfocan principalmente en viviendas unifamiliares modestas, evaluadas caso por caso (por ejemplo, una casa como unidad funcional), mientras que en Estados Unidos se emplean indicadores genéricos por metro cuadrado o se integran en inventarios macroeconómicos (Gámez-García et al., 2019). Respecto a las bases de datos, en América Latina se emplean comúnmente Ecoinvent (de origen suizo) o ICE (del Reino Unido), cuya adaptación ha sido considerada viable dada la escasez de

bases locales (Ecoinvent Centre, 2014). En cambio, Estados Unidos cuenta con bases específicas como USLCI, desarrolladas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), además de herramientas comerciales como Athena o BEES, aunque estas no siempre se integran en publicaciones académicas revisadas por pares.

Pese a estas diferencias metodológicas y contextuales, los porcentajes de impacto por etapa del ciclo de vida se mantienen sorprendentemente consistentes entre regiones, lo que sugiere que las conclusiones clave sobre sostenibilidad en vivienda social son generalizables. En síntesis, la literatura comparada muestra que la producción de hormigón y acero constituye la principal fuente de carga ambiental, tanto en Latinoamérica como en Norteamérica (De Lara y Penteado, 2024; DOE, 2024).

En cuanto a estrategias de mitigación, en América Latina predominan las basadas en materiales alternativos locales —como puzolana, bambú y suelos estabilizados— y en el diseño eficiente para reducir volúmenes constructivos (Tello-Ayala et al., 2023; Salzer et al., 2017). En contraste, en Estados Unidos y Canadá se enfatizan soluciones industriales, como el uso de cementos verdes (por ejemplo, LC3), tecnologías de reciclaje de acero y agregados, y procesos industriales más eficientes (DOE, 2024). Sin embargo, en todos los casos analizados, el mayor potencial de mejora ambiental se encuentra en la fase de producción (A1–A3) de los materiales.

Para armonizar resultados y metodologías, se recomienda avanzar en el desarrollo de bases de datos regionales y en la estandarización del alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el objetivo de facilitar comparaciones internacionales y promover la transferencia de buenas prácticas. Solo con una visión integrada —adaptada a las condiciones climáticas, económicas y culturales de cada región— será posible maximizar la reducción de impactos ambientales en el sector de vivienda social (Gámez-García et al., 2019; Salzer et al., 2017; Tello-Ayala et al., 2023; De Lara y Penteado, 2024; DOE, 2024).

Otra diferencia observada entre estudios es la tipología de vivienda social analizada. En México y Brasil se incluyeron tanto viviendas unifamiliares como prototipos urbanos de interés social, mientras que en Ecuador se identificaron casos de vivienda rural y estructuras con materiales alternativos como bahareque (bambú guadua). Sin embargo, no existe aún una sistematización que permita comparar de manera robusta las variaciones de impacto entre vivienda rural y urbana, ni entre tipologías verticales y unifamiliares. Esto constituye un vacío de investigación que limita la extrapolación de resultados a escala regional.

3.5. Recomendaciones para políticas públicas

Con base en los hallazgos presentados, se identifican varias líneas estratégicas de acción que podrían orientar el diseño de políticas públicas hacia una construcción de vivienda social más sostenible en América Latina. En primer lugar, se recomienda la implementación de estándares técnicos obligatorios que promuevan el uso de materiales con menor impacto ambiental. Específicamente, se sugiere exigir que al menos el 30% del contenido de los concretos provenga de materiales cementantes suplementarios (SCM), tales como cenizas volantes, escoria de alto horno o puzolanas naturales. Diversos estudios han demostrado que esta práctica permite reducir de forma significativa las emisiones derivadas del proceso de clinkerización, sin comprometer el desempeño estructural de las edificaciones (Mushtaq et al., 2022; Scrivener et al., 2017; Nazeer et al., 2023; López Gómez y Cultrone, 2025; Al Asmari et al., 2025).

Complementariamente, se propone establecer un mínimo del 50% de contenido reciclado en el acero utilizado en estructuras. Esta medida se basa en la evidencia de que el acero reciclado mediante hornos de arco eléctrico puede reducir su huella de carbono en más del 70% respecto al acero producido primariamente (Kim et al., 2022; Cervantes Puma et al., 2024).

Además, se considera esencial implementar instrumentos económicos que fomenten prácticas sostenibles durante todo el ciclo de vida de los materiales. Créditos fiscales y subsidios dirigidos podrían incentivar el uso de elementos prefabricados, los cuales permiten optimizar el uso de insumos, reducir desperdicios y mejorar la calidad en obra. De igual forma, políticas públicas que fortalezcan la logística inversa de residuos de construcción y demolición (RCD) contribuirían significativamente al cierre de ciclos de materiales y a disminuir el agotamiento de recursos naturales (Colorado et al., 2022; Maués et al., 2021; Zabalza Bribián et al., 2009; Sparrevik et al., 2021).

Estas herramientas económicas deben estar acompañadas de criterios técnicos claros, que permitan vincular los beneficios fiscales al desempeño ambiental real de los proyectos, evaluado mediante herramientas reconocidas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Finalmente, uno de los desafíos estructurales más relevantes en la región es la escasa disponibilidad de información ambiental estandarizada y contextualizada sobre materiales de construcción. En este sentido, se propone la creación de plataformas de datos nacionales y regionales que contengan inventarios primarios, verificables y de

libre acceso. Estas plataformas deberían ajustarse a los lineamientos de la norma ISO 14067 sobre huella de carbono de productos, y ser gestionadas con respaldo institucional que garantice su actualización y fiabilidad (Ciroth et al., 2020). La existencia de sistemas de gobernanza sólidos para los datos ambientales constituye un requisito indispensable para la formulación de políticas basadas en evidencia, la mejora de los procesos de contratación pública sustentable y el monitoreo continuo del desempeño ambiental del sector de la construcción.

Si bien la economía circular ofrece un marco prometedor para reducir impactos ambientales, en América Latina su implementación enfrenta barreras tecnológicas, normativas y sociales. Desde el punto de vista técnico, existe escasa infraestructura para la demolición selectiva y el procesamiento de materiales reciclados. Normativamente, no se han establecido aún estándares claros que garanticen la calidad de materiales secundarios en vivienda social. A nivel social, persiste la percepción negativa hacia materiales reciclados o de segunda mano, lo que dificulta su aceptación en proyectos habitacionales. Superar estas barreras requerirá no solo de incentivos económicos, sino también de campañas de concientización y procesos de certificación que aseguren la confianza de los usuarios finales.

4. Conclusiones

Este artículo ha abordado, desde una revisión sistemática de literatura científica, la sostenibilidad ambiental del concreto y del acero en la construcción de vivienda social en América Latina, empleando como eje metodológico el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Los resultados permiten concluir que, si bien ambos materiales siguen representando una porción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector construcción, también existen soluciones técnicamente viables y económicamente factibles para mitigar sus impactos cuando se aplican estrategias de ecodiseño, circularidad y sustitución parcial de insumos.

En el caso del concreto, la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCM), como escoria de alto horno y cenizas volantes, se presenta como una alternativa de alto rendimiento ambiental y estructural, con reducciones de hasta un 40% en la huella de carbono del material. Sin embargo, su adopción aún es incipiente en varios países de la región debido a barreras normativas y a la escasa disponibilidad de datos regionalizados sobre su desempeño. De forma similar, el acero reciclado, cuando proviene de procesos como los hornos de arco eléctrico y con contenido superior al 50%, puede reducir hasta en un 70% las emisiones frente al acero primario. No obstante, su integración

en proyectos de vivienda social requiere de políticas claras de fomento a la economía circular, infraestructura adecuada para la recolección de chatarra metálica y normativas técnicas que garanticen su calidad.

Asimismo, los estudios analizados revelan que la evaluación de la sostenibilidad de estos materiales no puede limitarse a su impacto en fase de producción. Un enfoque de ciclo de vida completo permite identificar oportunidades de mejora también en las fases de transporte, construcción, uso, mantenimiento y fin de vida útil. Esto subraya la necesidad de integrar el ACV como herramienta obligatoria en el diseño, planificación y licitación de proyectos de vivienda social financiados con fondos públicos, como ya ocurre en algunos países europeos.

Otro hallazgo importante es la brecha significativa entre el conocimiento técnico-científico existente y su aplicación en la práctica. La mayor parte de los estudios revisados reportan resultados consistentes respecto a la efectividad ambiental de tecnologías de bajo impacto; sin embargo, su implementación masiva se ve limitada por la ausencia de marcos normativos armonizados, la falta de incentivos económicos adecuados y la baja disponibilidad de bases de datos regionales abiertas, que limiten la necesidad de utilizar factores de emisión genéricos no representativos del contexto local.

En este contexto, el fortalecimiento de las capacidades institucionales para recopilar, validar y difundir datos de ACV con enfoque territorial resulta fundamental. Sin una gobernanza sólida de la información ambiental, será difícil establecer estándares verificables ni fomentar una competencia justa entre proveedores de materiales. En paralelo, la integración del enfoque de desmontaje y reutilización de componentes desde la etapa de diseño arquitectónico se perfila como una estrategia de largo plazo para alcanzar una verdadera economía circular en el sector de la construcción social.

La sostenibilidad del concreto y del acero en la vivienda social no es solo un ejercicio técnico. Requiere sinergias entre políticas públicas, innovación tecnológica, formación profesional y participación del sector privado. Solo mediante una acción coordinada entre estos actores será posible transformar la vivienda social en América Latina en un vehículo efectivo para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático y justicia ambiental.

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

© Derechos de autor: Germán Vélez-Torres y Karla Alvarado Palacios, 2026

© Derechos de autor de la edición: *Estoa*, 2026.

5. Referencias bibliográficas

- Al Asmari, A. F., Bashir, M. I., Farooq, F. & Asif, U. (2025). Investigating the effect of locally available volcanic ash on mechanical and microstructure properties of concrete. *Revista de Avances en Materiales*, 64(1). <https://doi.org/10.1515/rams-2024-0085>
- Bianchi, P. F., Yepes, V., Vitorio, P. C. & Kripka, M. (2021). Study of alternatives for the design of sustainable low-income housing in Brazil. *Sustainability*, 13(9), 4757. <https://doi.org/10.3390/su13094757>
- Caldas, L. R., Lira, J. S. d. M. M., Melo, P. C. d. & Sposto, R. M. (2017). Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasília: Proposal of design guidelines for low-carbon social housing. *Ambient. Construido*, 17(3), 71–85. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000300163>
- CADIS. (2019). *Software Mexicaniah*. <http://mexicaniah.net/CadisBootstrap/mexicaniah.php>
- Cervantes Puma, G. C., Salles, A., Turk, J., Ungureanu, V. & Bragança, L. (2024). Utilisation of reused steel and slag: Analysing the circular economy benefits through three case studies. *Buildings*, 14(4), 979. <https://doi.org/10.3390/buildings14040979>
- Ciroth, A., Di Noi, C., Burhan, S. S. & Srocka, M. (2020). *LCA database creation: Current challenges and the way forward*. Greendelta.com. <https://www.greendelta.com/wp-content/uploads/2020/09/LCA-database-creation.pdf>
- Colorado, H. A., Muñoz, A. & Neves Monteiro, S. (2022). Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia. *Sustainability*, 14(12), 7225. <https://doi.org/10.3390/su14127225>
- Contreras, M., Teixeira, S., Lucas, M., Lima, L., Cardoso, D., Da Silva, G., Gregório, G., De Souza, A. & Dos Santos, A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials*, 123, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>
- Córdoba, G., Paulo, C. I. y Irassara, E. F. (2023). Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a la región metropolitana de Buenos Aires. *Revista Hormigón*, 64.
- CYPE. (2017). *Home Page of CYPELATAM*. <http://www.cypelatam.com/>
- De Lara, B. L. E. & Penteado, C. S. G. (2024). Environmental assessment of construction waste prevention: A case study in a social housing project in Southeast Brazil. *Cleaner Waste Systems*, 8, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100145>
- Ecoinvent Centre. (2014). *Home Page of Ecoinvent*. <https://www.ecoinvent.org/database/introduction-to-ecoinvent-3/introduction-to-ecoinvent-version-3.html>
- García-Gusano, D., Dufour, J. & Iribarren, D. (2015). Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 674–684. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0861-1>
- Gómez-García, D. C., Saldaña-Márquez, H., Gómez-Soberón, J. M., Arredondo-Rea, S. P., Gómez-Soberón, M. C. & Corral-Higuera, R. (2019). Environmental challenges in the residential sector: Life cycle assessment of Mexican social housing. *Energies*, 12(14), 2837. <https://doi.org/10.3390/en12142837>
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P. & Zhu, T. (2023). A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. *Journal of Environmental Sciences*, 136, 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.013>
- Hossain, M. U., Cai, R., Ng, S. T., Xuan, D. y Ye, H. (2020). Sustainable natural pozzolana concrete – A comparative study on its environmental performance against concretes with other industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 258, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121429>
- ISO 14044. (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*. ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
- Jiménez, A. y Freire, J. (2024). *Estudio de la ceniza proveniente del volcán Sangay sedimentada en el río Volcán para su implementación en la industria del cemento* [Tesis de grado, Escuela Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/23424/1/53T0108.pdf>
- Kim, J., Park, S., Park, J., Lee, H., Choi, Y., Lee, J. & Jang, H. (2022). Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research y Social Science*, 89, 102565. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>
- Küpfer, C., Bastien-Masse, M. & Fivet, C. (2022). Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135235. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>
- López Gómez, M. & Cultrone, G. (2025). Study of the mineralogical and textural properties of bricks with volcanic ash temper. *Applied Clay Science*, 266, 107690. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107690>
- Marinković, S., Dragaš, J., Ignjatović, I. & Tošić, N. (2017). Environmental assessment of green concretes for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 154, 633–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.218>
- Maués, L. M., Beltrão, N. & Silva, I. (2021). GHG emissions assessment of civil construction waste disposal and transportation process in the eastern Amazon. *Sustainability*, 13(10), 5666. <https://doi.org/10.3390/su13105666>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (MIDUVI). (2024, 12 de diciembre). *Déficit Habitacional Nacional*. <https://www.habitatvivienda.gob.ec/deficit-habitacional-nacional/>
- Mushtaq, S. F., Memon, M. A., Javed, M. I. & Memon, A. S. (2022). Effect of Bentonite as Partial Replacement of Cement on Residual Properties of Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Sustainability*, 14(18), 11580. <https://doi.org/10.3390/su141811580>
- Nazeer, M., Kapoor, K. & Singh, S. P. (2023). Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 69, 106275. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106275>
- Petroche, D. M. & Ramirez, A. D. (2022). The environmental profile of clinker, cement, and concrete: A life cycle perspective study based on Ecuadorian data. *Buildings*, 12(3), 311. <https://doi.org/10.3390/buildings12030311>
- Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E. y Gálvez, A. (2016). *Guía general para*

- la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. CEPAL.
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a5f80abc-8063-4e19-b871-e954f1db5bf6/content>
- Salzer, C., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y. & Kono, J. (2017). Environmental performance of social housing in emerging economies: Life cycle assessment of conventional and alternative construction methods in the Philippines. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(11), 1785–1801. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1362-3>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S. & Maity, S. (2017). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Silva, J., Almeida, M. & Bragança, L. (2023). Integration of life cycle thinking in building renovation: Comparative analysis between concrete and steel systems. *Sustainability*, 15(2), 934. <https://doi.org/10.3390/su15020934>
- Sparrevik, M., de Boer, L., Michelsen, O., Skaar, C., Knudsen, H. & Fet, A. M. (2021). Circular economy in the construction sector: Advancing environmental performance through systemic and holistic thinking. *Environmental Systems and Decisions*, 41(3), 392–400. <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09803-5>
- Tello-Ayala, K., Salazar, R., Torres, C. & Rodríguez, D. (2023). Comparative analysis of the sustainability and seismic performance of a social interest house using RC moment frames and bahareque as structural systems. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1150826. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1150826>
- U.S. Department of Energy [DOE]. (2024). *Embodied Carbon Reduction in New Construction Reference Guide* (DOE/EE-2812).
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodríguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R. & Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.003>
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A. & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510–2520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>