

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL NEGATIVO EN VIVIENDAS VIS EN PASTO, COLOMBIA¹

MITIGATION STRATEGIES TO REDUCE THE NEGATIVE ENVIRONMENTAL IMPACT OF SINGLE-FAMILY LOW-INCOME HOUSING IN PASTO, COLOMBIA

DOI: <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.35.1.2025.04>

Artículo recibido: mayo 19 de 2025. Aceptado: septiembre 25 de 2025. Publicado: octubre 5 de 2025.

Nicole Valeria Cabrera Pantoja 
Universidad CESMAG

Armando José Quijano Vodniza 
Universidad CESMAG

Para citar este artículo:

Cabrera Pantoja, N. V., & Quijano Vodniza, A. J. (2025). Estrategias de mitigación para reducir el impacto ambiental negativo en viviendas vis en Pasto, Colombia. *Módulo Arquitectura CUC*, 35(1), 88-116. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.35.1.2025.04>

Resumen

El sector de la construcción genera un alto impacto ambiental, particularmente en zonas como el barrio Carlos Pizarro de San Juan de Pasto. Este estudio evalúa dicho impacto en viviendas unifamiliares de interés social mediante el Eco-Indicador 99, herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ajustada a la norma ISO 14040. Se cuantificó la carga ambiental de los materiales y se identificaron los más contaminantes, proponiéndose como alternativas más sostenibles con menor impacto. También se integraron estrategias de construcción para mejorar la gestión de los recursos naturales. Se compararon los modelos de vivienda actuales y propuestos y se incorporó una sección de evaluación comparativa con casos similares para analizar la viabilidad de la metodología. El estudio concluye que el impacto ambiental está estrechamente vinculado a materiales específicos. Se recomienda la aplicación del ACV en futuras investigaciones, centrándose en viviendas de la misma tipología para obtener resultados comparables que respalden la toma de decisiones sostenibles.

Palabras clave: análisis del ciclo de vida, eco indicador 99, impacto ambiental, milipunto, viviendas de interés social.

Abstract

The construction sector generates a high environmental impact, particularly in the Carlos Pizarro neighborhood in San Juan de Pasto. This study assesses the environmental impact of single-family social housing using the Eco-Indicator 99, a Life Cycle Assessment (LCA) tool aligned with ISO 14040 standards. The environmental burden of materials was quantified, and the most polluting ones were identified and proposed as more sustainable alternatives with a lower impact. Sustainable construction strategies were also integrated to improve natural resource management. The current and proposed housing models were compared, and a comparative evaluation section with similar cases was incorporated to analyze the feasibility of the methodology. The study concludes that the environmental impact is closely linked to specific materials. It recommends the application of LCA in future research, focusing on housing of the same typology to obtain comparable and meaningful results that support sustainable decision-making.

Keywords: eco-indicator 99, environmental impact, life cycle assessment, milipoint, social housing.

¹ Grupo de investigación: Biodiverciudades, Universidad Cesmag



INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población mundial ha incrementado significativamente la demanda de recursos naturales extraídos del medioambiente. Según las Naciones Unidas (2024), la población mundial se ha triplicado desde mediados del siglo XX, alcanzando los 8 mil millones de personas en noviembre de 2022. Este incremento poblacional tiene implicaciones directas en la demanda de recursos y energía. En este sentido, Según Wang et al. (2023), el crecimiento poblacional urbano puede incrementar el consumo energético de edificaciones hasta en un 52,2 %, lo que, en contextos dependientes de combustibles fósiles, se traduce en un aumento proporcional de emisiones y presión ambiental. Esta relación evidencia que la expansión demográfica, sin una transición hacia fuentes limpias, amplifica la huella ecológica del sector edificatorio.

En Colombia, los edificios representan el 29% del consumo total de energía del país, de los cuales el 22% corresponde al sector residencial, el 7% al sector comercial y público y el 0.03% al sector de la construcción. Asimismo, el sector edificatorio es responsable del 10.5% de las emisiones de CO₂ y del 40% de los residuos generados en el país (CCCS, 2024). Estas cifras son coherentes con estimaciones internacionales que sitúan al sector edificatorio como responsable de entre el 30 % y el 40 % del consumo energético final y de cerca del 27 % de

las emisiones globales de CO₂ (ÜrgeVorsatz et al., 2020; UNEP, 2022).

En este contexto, los eco indicadores son métodos eficaces para cuantificar el impacto ambiental de procesos y productos. En este caso particular, se utilizó el Eco-Indicador 99 para evaluar las tendencias de impacto ambiental de las viviendas unifamiliares de interés social, diseñadas para garantizar el acceso a la vivienda a hogares de bajos ingresos, cumpliendo con altos estándares de planificación urbana, diseño arquitectónico y construcción sostenible. Estas viviendas no deben superar un valor de 135 veces el salario mínimo legal mensual vigente (MinVivienda, 2023). Según un informe publicado por el Congreso Colombiano sobre Construcción Sostenible, basado en la Encuesta Nacional de Calidad de Vida realizada por el DANE en 2022, Colombia contaba con 17.3 millones de viviendas en ese año (CCCS, 2024). Es crucial que las viviendas existentes implementen mejoras que promuevan la salud, el bienestar y el uso eficiente de los recursos, al tiempo que avanzan hacia la descarbonización para cumplir con los objetivos de la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Cero Carbono (HR-ENCC). Este plan busca reducir en un 30 % las emisiones operacionales para 2030 e incluye medidas para fortalecer la resiliencia de las viviendas frente a eventos climáticos extremos (Cámara Colombiana de la Construcción, 2024).

Por lo tanto, esta investigación se centra en el barrio Carlos Pizarro en San Juan de Pasto, ubicado en el departamento de Nariño, donde

todas las viviendas comparten una tipología de diseño común. El objetivo es evaluar las tendencias de impacto ambiental de las viviendas unifamiliares de interés social adosadas. Para lograrlo, los investigadores basarán el cálculo de los indicadores de impacto en el Eco-Indicador 99, dentro de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este sentido, la aplicación de metodologías simplificadas de Análisis de Ciclo de Vida, como lo demuestra [Eleftheriou et al. \(2022\)](#), constituye una estrategia eficaz para incorporar criterios de sostenibilidad desde las primeras fases del diseño. Estas herramientas permiten obtener resultados comparables sin requerir un alto grado de especialización técnica, favoreciendo la identificación temprana de los materiales y procesos con mayor incidencia ambiental. Así, su integración con métodos de evaluación como el Eco-indicador 99 posibilita una cuantificación precisa y oportuna de los impactos, fortaleciendo la toma de decisiones orientada a minimizar la huella ambiental de las edificaciones analizadas. Los indicadores de los materiales se medirán por kilogramo ([Goedkoop et al., 1999](#)). Este método de evaluación de impacto modela el deterioro causado por las emisiones mediante el análisis de objetivos, análisis de exposición, análisis de efectos y análisis de daños, utilizando la unidad “Punto de Eco-Indicador” (Pt). En las listas de Eco-Indicadores, la unidad de medida generalmente se expresa en milipuntos (mPt), donde $700 \text{ mPt} = 0.7 \text{ Pt}$ ([Goedkoop et al., 1999](#)). Para determinar el impacto final de la

vivienda, los investigadores deben identificar la masa total de los materiales en kilogramos, lo que permitirá una evaluación más precisa del impacto ambiental y los problemas asociados.

Junto con la necesidad de evaluar el impacto ambiental y proponer estrategias de mitigación para el sector de la construcción, también es esencial abordar el impacto ambiental significativo causado por las viviendas. La relación entre el consumo energético y el medio ambiente está ampliamente documentada, dado que la fase de uso en edificios residenciales puede representar hasta el 84 % del consumo total de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de su ciclo de vida ([Fan & Fang, 2023](#)). Este alto consumo, impulsado por el crecimiento poblacional y la digitalización, intensifica la explotación de recursos naturales y las emisiones, contribuyendo al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental. La relación entre el consumo energético y el medioambiente está ampliamente documentada. [Buonocore et al. \(2021\)](#) destacan que entre 2007 y 2018, la transición en EE. UU. del carbón hacia fuentes como gas, biomasa y renovables permitió reducir las emisiones de CO₂ derivadas del sector energético en un 12 %, lo que sugiere beneficios indirectos en salud pública por menores emisiones de contaminantes atmosféricos.

Adicionalmente, se proponen estrategias alternativas que aprovechen los recursos naturales, como la instalación de tanques de almacenamiento de agua y el uso de energía

solar. Estas soluciones ofrecen beneficios significativos en regiones con alta radiación solar, como las zonas ecuatoriales donde se encuentra Colombia. En este contexto, [Betancur, Ortega-Ávila & López-Vidaña \(2024\)](#) identifican un alto potencial para la implementación de sistemas de energía solar térmica en Colombia, especialmente en zonas de clima frío. Su estudio señala que esta tecnología puede sustituir el uso de combustibles fósiles en viviendas, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorando las condiciones ambientales tanto a nivel local como global.

ALINEACIÓN CON MARCOS Y CERTIFICACIONES INTERNACIONALES DE SOSTENIBILIDAD

La presente investigación mediante la metodología Eco-Indicador 99 en conformidad con la ISO 14040, permitió cuantificar el impacto ambiental de una vivienda evaluada en mPt identificando materiales con mayor contribución al impacto total. La sustitución de materiales convencionales por alternativas de menor impacto generó reducciones significativas. Estos resultados se alinean con los requisitos del crédito Building Life-Cycle Impact Reduction de la certificación LEED v4.1, que promueve la optimización del diseño de edificaciones a través de reducciones de al menos un 10% en múltiples categorías de impacto ambiental, demostradas mediante un ACV conforme a ISO 14040, lo

cual asegura la compatibilidad metodológica con marcos internacionales como BREEAM. En particular, el crédito Mat 01 – Environmental impacts from construction products, al igual que la certificación EDGE que dentro de sus 3 categorías incluyen la eficiencia en materiales mediante un acv iso 14040. Además el estándar PassivHaus impulsa construcciones con un consumo energético muy reducido, fijando restricciones rigurosas sobre el uso de energía primaria y promoviendo el aprovechamiento de energías renovables. En este contexto, la implementación de sistemas fotovoltaicos se ajusta a los principios de este estándar al disminuir la dependencia de la energía de la red y aumentar la eficiencia energética del hogar.

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, la presente investigación se vincula de manera particular con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), que promueven la reducción del impacto ambiental de las edificaciones mediante una gestión eficiente de los recursos y el fomento de prácticas constructivas sostenibles. ([CCCS & IFC, 2020](#)). En este sentido, la utilización de materiales que disminuyan la huella ambiental, junto con el empleo de insumos reciclados, no solo contribuye a mejorar la calidad ambiental, sino que también favorece la implementación de estrategias de sostenibilidad en el ámbito urbano.

La cuantificación del impacto ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a la norma ISO 14040 permite medir y orientar acciones coherentes con estos objetivos globales. Asimismo, la metodología adoptada se enmarca en los principios de la economía circular, priorizando el uso de materiales con menor impacto ambiental y fomentando su reutilización o reciclaje, prolongando así su ciclo de vida útil. La sustitución de materiales de alto impacto por alternativas sostenibles también responde a los enfoques del diseño regenerativo, orientado a restituir y mejorar el capital natural, y de la arquitectura resiliente, que busca desarrollar edificaciones capaces de adaptarse a cambios ambientales y mitigar riesgos asociados al cambio climático.

De igual manera, este trabajo se alinea con las políticas internacionales de descarbonización, como el Pacto Verde Europeo, que establece estrategias para alcanzar la neutralidad climática mediante la reducción de emisiones y la promoción de energías renovables. Finalmente, la incorporación de sistemas de generación solar y la implementación de tanques soterrados para la gestión de aguas pluviales se alinean con las pautas de ONU-Hábitat en cuanto a urbanismo sostenible y adaptación al cambio climático. Estas tácticas trabajan en conjunto para generar espacios edificados con emisiones reducidas, elevado rendimiento energético y una administración eficiente de los recursos hídricos, mejorando así la habilidad

de las construcciones para enfrentar los retos ambientales actuales.

Selección de la vivienda tipo

El criterio utilizado para la elección de la vivienda se basa en lo establecido por el **Concejo Municipal de Pasto. (2009)**, donde el POT define un área mínima para vivienda familiar entre 50 y 60 m². En este estudio se adopta una vivienda real con un área de 64 m², valor que se encuentra dentro del rango de vivienda VIS observado en la ciudad y que permite cumplir con las directrices urbanas municipales señaladas en el POT de San Juan de Pasto.

Además, la vivienda comparte características arquitectónicas similares a las de urbanizaciones aledañas, tanto dentro como fuera de San Juan de Pasto, como se interpreta en el estudio realizado por **Chacón, Chamorro y López (2010)** en la Universidad Jorge Tadeo Lozano y la Universidad de Nariño. Este estudio describe viviendas de aproximadamente 70 m², con acabados como dos alcobas, baño, cocina con mesón enchapado y pisos esmaltados.

De igual forma, en municipios cercanos como Sandoná, el Fondo de Adaptación entregó viviendas tipo casa en la urbanización Villa Cafelina, construidas sobre lotes de 66 m² y equipadas con sala, comedor, cocina, baño y dos habitaciones, lo que evidencia que este modelo constructivo es común en la región (**Fondo Adaptación, 2015**).

Por otro lado, los proyectos VIS publicados por **Comfamiliar de Nariño (2024)** muestran

que el área de las viviendas registradas oscila entre 50 y 62 m²

Los materiales de la vivienda estudiada desde el eco indicador 99

Lo primero que se hizo fue el levantamiento arquitectónico de la vivienda tipo VIS seleccionada de la ciudad de Pasto. Dicho levantamiento se realizó tanto en planimetría (utilizando un distanciómetro láser), como en 3D, con el software Revit.

Posteriormente, se hizo un desglose de todos los materiales que compone la vivienda, para lo cual se determinó el volumen de cada material, el cual se multiplica por la densidad, según la norma NSR-10 ([Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica \[AIS\], 2010](#)), para obtener la masa.

Estos valores sirvieron como base para el análisis el cual se enmarcó en la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), acorde con la norma ISO 14040, centrándose en la fase C, correspondiente a la evaluación de impacto. Para ello, se empleó el método Eco-indicador 99 (EI99), que integra daños a la salud humana, a la calidad del ecosistema y a los recursos. Asimismo, se calcularon los milipuntos para cada material, tomando como referencia las tablas de la Cartilla Anexo Eco-indicador 99 (1999) del ACV, (como se observa en la tabla 1). En esta cartilla, la unidad de medida para el eco-indicador es el Punto Eco-indicador (Pt);

sin embargo, se utiliza comúnmente la unidad de milipuntos (mPt), donde 700 mPt equivalen a 0,7 Pt.

La escala se ha elegido de forma que el valor de un 1 Pt representa una centésima de la carga ambiental de un ciudadano europeo promedio anual².

De igual forma, es importante resaltar que los valores estándar del Eco-indicador 99 poseen una clasificación. Para este estudio se utilizó la correspondiente a materiales, la cual expresa el impacto ambiental en milipuntos por kilogramo (mPt/kg). Este valor indica cuántos milipuntos de impacto ambiental están asociados a la producción, uso o disposición final de 1 kg de dicho material.

Por otro lado, es importante aclarar que para obtener la masa total del concreto se debe restar la masa del acero a la masa del concreto como se muestra en la [Tabla 3](#).

² Este valor se calcula dividiendo la carga ambiental total en Europa entre el número de habitantes y multiplicándolo por 1000.

Tabla 2 Cálculo total de impacto ambiental de la vivienda actual

Material	Nombre del indicador	Masa	Indicador	Milipuntos
Concreto	Hormigón sin refuerzo	89.462,7 kg	3,8	348.907
Ladrillo	Material cerámico	26.340 kg	28	742.190
Hierro para puertas	Hierro fundido	498 kg	240	119.578
Hierro para marcos de puertas	Hierro fundido	165,6 kg	240	39.744
Mortero	Cemento + arena	3.120,2 kg	20,8	64.964
Vidrio	Vidrio no revestido	100,9 kg	49	4.944
Pintura acrílica	Pintura acrílica	2096 kg	130	272.532
Hierro para marcos de ventanas	Hierro fundido	385,2 kg	240	92.448
Madera para marcos de ventanas	Tablero madera	29,3 kg	6,6	193,3
Madera para puertas	Tablero madera	179 kg	6,6	1.181,5
Madera para marcos de puertas	Tablero madera	17,59 kg	6,6	116,08
Cerámica	Material cerámico	1288 kg	28	36.066
Fibrocemento para tejas	Cemento	795 kg	20	15.900
Acero para soporte estructural	Acero de alta aleación	1405,8 kg	910	1.279.329
Superboard para cielo raso	Cemento	619 kg	20	12.380
Concreto para piso	Hormigón sin refuerzo	23040 kg	3,8	87.552
Total				3.109.076

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Cálculo total del concreto sin acero

Masa total del material	Cantidades	Porcentajes
Concreto reforzado	90.868,6 kg	100%
Acero	1.405,9 kg	1,20%
Concreto sin refuerzo	89.462,7 kg	89,40%

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la **Tabla 2**, la vivienda actual genera un impacto de 3.109.076 milipuntos, valor que representa la carga ambiental generada por persona.

Propuesta de mejoramiento de los materiales para la vivienda a partir el eco indicador 99

Con base en la revisión de los antecedentes, se determinaron los materiales que eventualmente podrían mejorar la condición actual de la vivienda VIS y la calidad de vida

de los habitantes. En el proceso de selección de materiales se tuvo en cuenta el indicador que arrojaba, teniendo en cuenta que entre más alto este sea, mayor será el impacto ambiental generado.

Tabla 4. Análisis de Materiales de Bajo Impacto y Reciclados para la Reducción de la Huella Ambiental.

Material	Posibilidad de ser reciclado	Generación de contaminación	Indicador
Tejas de poli aluminio reciclado	Alto	0%	-240 y -720 ³
Fibra de vidrio	Alto	25%	49 y -15 ⁴
PVC reciclado para marcos de ventanas	Alto	0%	-170
Pintura	Alto	35%	-240 y -720 ⁵
Soleras de madera	Medio	100%	6,6
Panel yeso	Medio	100%	6,6
Suelo en concreto	Medio	100%	9,9
Cimentación ciclópea	Medio	100%	3,8
Vidrio 4mm	Medio	100%	3,8
Acero	Bajo	100%	49
Madera para puertas	Medio	100%	86
Madera para marcos de puertas	Medio	100%	6,6
Laminado de madera para piso	Medio	100%	6,6
Láminas de superboard	Medio	100%	6,6

Fuente: Elaboración propia.

3 En el caso del poli aluminio, este tiene dos indicadores por cuanto está conformado por dos materiales reciclados: el reciclado del PET y el reciclado de aluminio.

4 En el caso de la fibra de vidrio, esta tiene dos indicadores por cuanto está conformado por dos materiales uno reciclado de vidrio: 49 y un reciclado correspondiente al reciclado de vidrio: 15.

5 En el caso del PVC, este cuenta con un indicador negativo por cuanto se conforma por un material reciclado: el reciclado de PVC.

Con base en la posibilidad de ser reciclados, la generación de contaminación y el indicador, se decidió implementar los materiales que habían sido analizados previamente. De este modo, se crearon dos modelos de propuesta para el estudio. El primer modelo reflejaba la intervención únicamente en los muros internos de la vivienda analizada, mientras que el segundo modelo presentaba una propuesta total de materiales, conservando el diseño original; esto con el fin de realizar comparaciones de impacto.

Análisis del Ciclo de Vida en la Intervención Propuesta para el Cambio de Muros Internos.

En esta primera propuesta, se optó por reemplazar la mampostería de ladrillos con una estructura de madera, aislada con fibra de vidrio y recubierta con panel de yeso, sin modificar los demás materiales utilizados en la construcción de la vivienda, como en el caso anterior, se calcularon los milipuntos de cada material, como se detalla en la [Tabla 5](#).

Tabla 5. Cálculo de la masa y del impacto ambiental total en la vivienda: Primera propuesta

Material	Nombre del indicador	Masa	Indicador	Milipuntos
Concreto para estructura	Hormigón sin refuerzo	89.462,74 kg	3,80	339.958
Concreto para suelo	Hormigón sin refuerzo	23.040 kg	3,80	87.552
Mampostería en ladrillo	Material cerámico	17.172,09 kg	28	480.819
Hierro para puertas	Hierro fundido	498,2 kg	240	119.578
Mortero	Cemento + arena	1.445,01 kg	20,82	30.085
Vidrio 4mm	Vidrio no revestido	80,4 kg	49	3.939
Puntura acrílica	Pintura acrílica	2.054 kg	130	266.990
Madera para puertas internas	Madera maciza	179 kg	6,6	1.182
Baldosa para piso	Material cerámico	1.288 kg	28	36.066
Teja fibrocemento	Cemento	825 kg	20	16.500
Acero para estructura	Acero de alta aleación	1.405,86 kg	910	1.279.329
Hierro para marcos de ventanas	Hierro fundido	1.386 kg	240	332.640
Madera para marcos de puertas	Madera maciza	17,59 kg	6,6	116
Hierro para marco de puertas	Hierro fundido	165,6 kg	240	39.744
Techo superboard	Cemento	603,5 kg	20	12.071
Soleras de madera	Madera maciza	1.242 kg	6,6	8.197
Panel yeso	Yeso	872 kg	9,9	8.633
Fibra de vidrio	Vidrio no revestido+ Reciclado vidrio	4.277 kg	49 y -15	33.843
Total				3.097.241

Fuente: Elaboración propia.

Esto implica que, con la primera propuesta, la cantidad de 3.109.076 milipuntos se ha reducido a 3.097.241 milipuntos por persona, lo que representa una reducción de 11.835 mPt, equivalente al 0,6%.

todos los materiales de la vivienda. Como en el caso anterior, también se calcularon los milipuntos por cada material, como se muestra en la **Tabla 6**.

Propuesta de materiales sostenibles

Por otro lado, se analizó una segunda propuesta, en donde se realizó el cambio de

Tabla 6. Impacto ambiental total de la vivienda propuesta

Material	Nombre del indicador	Masa	Indicador	Milipuntos
Soleras de madera	Madera maciza	2.671,8 kg	6,6	17.634
Panel yeso	Yeso	4.809,6 kg	9,9	47.615
Fibra de vidrio	Vidrio no revestido + Reciclado vidrio	20.644 kg	49 y -15	33.843
Suelo en concreto	Hormigón sin refuerzo	15.364 kg	3,8	58.383
Cimentación ciclópea	Hormigón sin refuerzo	23.144 kg	3,8	87.947
Vidrio 4mm	Vidrio no revestido	107 kg	49	5.242
PVC reciclado para ventanas	Reciclado de PVC	106 kg	-170	-17.996
Acero	Acero	0,58 kg	86	50
Madera para puertas	Madera maciza	337,5 kg	6,6	2.228
Madera para marco de puertas	Madera maciza	50,63 kg	6,6	334
Pintura	Pintura acrílica + Reciclado de pintura	2.217,3 kg	130 y -64	6.210
Tejas Tetrapak	Reciclado de PET + Reciclado de aluminio	432 kg	-240 y -720	-4800
Piso laminado	Madera maciza	240 kg	6,6	1.585
Total				238.275

Fuente: Elaboración propia.

Esto significa que, con la segunda propuesta, la cantidad inicial de 3.109.076 milipuntos se ha reducido a 238.275 milipuntos por persona, lo que representa una disminución de 2.870.801 mPt, equivalente a una mitigación del 92% del impacto.

Evaluación cruzada. Con el propósito de contextualizar y respaldar los resultados obtenidos en esta investigación, se llevó a cabo un análisis comparativo con estudios previos que han aplicado metodologías equivalentes, como el método Eco-Indicador 99 en el marco del ACV. Esta comparación permite validar la metodología utilizada, identificar coincidencias en elementos constructivos y resultados, y establecer una base para la comparación de los hallazgos de este trabajo con investigaciones similares. Para ello, se seleccionaron estudios que emplean el mismo enfoque aplicado en esta investigación.

En el primer estudio, realizado por [Audaenaert et al. \(2012\)](#), se aplicó el método EI99 para comparar alternativas de un mismo material, evaluando no solo el impacto ambiental, sino también aspectos como el confort. Aunque la tipología arquitectónica difiere de la del presente trabajo, el uso de indicadores y el procedimiento de cálculo son compatibles con esta investigación. Entre los materiales evaluados, los autores identificaron la lana de vidrio o fibra de vidrio como uno de los de mayor beneficio ambiental, tanto para techos como para muros. Sin embargo, su estudio se centró únicamente en elementos no

estructurales, lo que explica que la madera no aparezca como material de bajo impacto, ya que en su análisis formaba parte de un sistema que incluía aislamiento de lana de roca, tableros OSB y placas de yeso. En contraste, el presente estudio evalúa tanto elementos no estructurales como estructurales, lo que permite identificar la madera como el material con mejor desempeño ambiental y arquitectónico.

El segundo estudio, realizado por [Rinne, R., Ilgin, H. E., & Karjalainen, M. \(2022\)](#) demuestra que, aunque la presente investigación aplica el método Eco-indicator 99, mientras que dicho estudio emplea un análisis de huella de carbono conforme a la norma EN 15978, ambos comparten el mismo marco metodológico de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) definido en la ISO 14040. El objetivo principal de los autores fue reducir la huella de carbono, concluyendo que la sustitución de materiales convencionales por alternativas de menor impacto, como la madera y la fibra de celulosa, genera reducciones significativas en el impacto ambiental. Comparando con la presente investigación, se llega a una conclusión coincidente en cuanto al uso de la madera como material de bajo impacto.

Finalmente, el estudio realizado por [Verbitsky y Pushkar \(2018\)](#) respalda la solidez metodológica del uso del Eco-indicator 99 (EI99) en la evaluación del ciclo de vida de edificaciones. Aunque sus resultados no son directamente comparables con los del presente trabajo, la comparación con la metodología ReCiPe evidenció tendencias consistentes

en la clasificación de impactos ambientales. Los autores reportaron que el sistema de losa de hormigón armado (RC) —compuesto principalmente por hormigón simple en su estructura— presentó, en la fase de producción de materiales (masa), un impacto de 7,26 mPt con EI99 y 2,83 mPt con ReCiPe, valores intermedios entre el bloque de concreto (CNB), de mayor impacto, y el bloque celular (CLB), de menor impacto. Este resultado demuestra que el RC, aunque no es la opción más desfavorable, tampoco alcanza el desempeño ambiental de tecnologías más ligeras y puede sustituirse por materiales de menor impacto, lo que coincide con los hallazgos de la presente investigación, donde se evidencia que es posible reemplazar el hormigón por alternativas con mejor desempeño ambiental.

En síntesis, los tres estudios analizados evidencian la pertinencia del ACV como herramienta para la evaluación del impacto ambiental y confirman la solidez metodológica del EI99. Aunque presentan diferencias en tipologías y materiales, convergen en señalar que alternativas como la madera y el panel de yeso pueden reducir significativamente el impacto ambiental y mejorar el confort térmico y acústico. De igual forma, materiales de mayor impacto, como el hormigón, pueden ser sustituidos por opciones más sostenibles sin comprometer el desempeño funcional.

Cálculo de impacto del reciclaje de la pintura. Dado que las cartillas del Eco-Indicator 99 no incluyen un indicador específico

para el reciclado de la pintura, se realizó una estimación indirecta basada en la estrategia de crédito evitado (avoided burden), reconocida y respaldada por el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y contemplada en la norma ISO 14044. Este enfoque, discutido en la literatura especializada como una alternativa válida en escenarios sin datos directos de reciclado, asigna un crédito ambiental equivalente al impacto evitado por la sustitución de materias primas vírgenes, sumando únicamente el impacto del proceso de recuperación (Ekvall et al., 2020).

El consumo energético de las maquinarias presentadas a continuación se basa en la metodología del Eco-indicator 99, que incluye tablas con factores de impacto expresados en mPt por kWh. Por ello, junto con la metodología de avoided burden, es necesario calcular el impacto de la máquina; en el caso de la pintura, para considerar la mezcla de contenido reciclado con material virgen. En cuanto al cálculo del impacto de la excavadora, dado que el impacto ambiental comienza desde la limpieza del terreno y nunca es cero, resulta fundamental determinar el impacto inicial de la construcción. Esta inclusión está respaldada por estudios que destacan la relevancia del gasto energético de la maquinaria en el impacto ambiental total, como Hong, B., & Lü, L. (2022), Haddad et al. (2023) y (Tijanić et al., 2019), que validan el uso de datos de rendimiento y consumo para estimar impactos en obras de movimiento de tierras.

Para calcular el impacto del reciclado de la pintura, que no se encuentra en las tablas del Eco-Indicador 99, se realizó el siguiente análisis, a partir del impacto positivo actualizado en la cartilla, donde el indicador equivale a 130 milipuntos. El procedimiento correspondiente es el siguiente: (i) tomar el impacto positivo de la cartilla y considerarlo como un valor negativo, dado que al reciclar el material se evitaría su producción. Por lo tanto, el valor inicial es -130. (ii) A este valor, se le debe restar el impacto del proceso de recuperación y reintegración del material al mercado. Y (iii) para obtener el impacto del proceso de recuperación, primero se debe conocer la eficiencia energética de la maquinaria utilizada en dicho proceso.

En el caso de la pintura, la maquinaria analizada es el mezclador de pintura industrial de la marca Yalian⁶. Las especificaciones técnicas de esta maquinaria son: potencia del motor: 5,5 kW, tiempo de operación: 60 minutos y capacidad de producción: 2000 litros.

Para calcular el tiempo de producción de la maquinaria y, posteriormente, estimar el consumo de combustible/energía, se adoptó la formulación propuesta por [Trani et al. \(2016\)](#), en la que el tiempo por unidad se define como: $P_{ri} = 1/Q$, siendo Q la productividad del equipo en m^3/h . El tiempo total requerido para procesar el volumen V se obtiene como:

$$t_{total} = P_{ri} \cdot V = \frac{V}{Q}$$

En primer lugar, las especificaciones técnicas de fábrica de la maquinaria establecen el rendimiento de la maquinaria por hora de trabajo mediante la siguiente expresión:

$$L/h \square = L/h$$

Remplazando:

$$\frac{2000L}{60 \text{ min}} = \frac{2m^3}{1h} = 2m^3/h$$

Por lo tanto, el tiempo por unidad es:

$$P_{ri} = \frac{1}{2m^3/h} = 0.5h/m^3$$

Si el volumen de pintura a preparar es de $V = 1,57$, el tiempo total se calcula como:

$$t_{total} = P_{ri} \cdot V = 0.5h/m^3 \times 1.57m^3 = 0.78h$$

El consumo energético horario de la mezcladora se estima aplicando la relación fundamental entre potencia y tiempo de operación, ajustada por factores de eficiencia y carga, según lo recomendado en la literatura técnica del sector industrial ([Zhou et al., 2016](#); [Li et al., 2022](#)). En este caso, la potencia nominal del motor se multiplica por el tiempo efectivo de trabajo y se corrige con la eficiencia operativa del equipo, que refleja las pérdidas mecánicas y eléctricas inherentes al sistema, así como con el factor de carga, que representa

6 Yalian Factory Price Auxiliary Machine Mixe (YMC-2000)

el grado de utilización de la capacidad nominal de la máquina (Electronics, 2022; Klanfar et al., 2016). La eficiencia del operador y las condiciones de la maquinaria se extrajeron del cuadro Factor de eficiencia del operador y mantenimiento (Tiktin, 1997), en condiciones favorables. De esta manera:

$$\text{Potencia del motor (kW)} * \text{Eficiencia del equipo} * \text{Tiempo de operación (hora)} * \text{Carga de trabajo}$$

Remplazando:

$$5.5\text{kW} \times 0.78 \times 0.78\text{h} \times 0.80 = 2.5\text{kWh}$$

Para calcular el indicador del reciclado de pintura se multiplica el factor de eficiencia encontrado de 2,5 kWh por el indicador de electricidad, 26 BV Europa (UCPTE) para bajo voltaje (<1000 Volt), según Goedkoop et al. (1999).

$$2,5 \text{ Kwh} * 26 = 65$$

Para obtener el indicador final, se suma el impacto de la pintura, representado como una cifra negativa, con el indicador de la maquinaria según el método avoided burden

$$-130 + 65 = -65$$

Cálculo de impacto inicial para construcción de la vivienda. Para determinar el impacto inicial, es necesario

estimar el consumo energético de la maquinaria requerida para iniciar la construcción. En este caso, se utilizó un procedimiento adaptado a partir de los cálculos de productividad propuestos por Trani et al. (2016), los cuales permiten estimar el rendimiento horario y el tiempo de operación de la excavadora. Además es importante resaltar que la productividad real de excavadoras está influenciada por el volumen del cucharón, el tiempo de ciclo, factores de llenado y esponjamiento, así como la competencia del operador y las condiciones del sitio (Kujundžić et al., 2021). Además, enfoques experimentales indican que ajustes en el motor, la carga y el perfil de operación pueden mejorar significativamente el rendimiento y reducir emisiones (Ng et al., 2016). En consecuencia, el factor de carga se identifica como una variable decisiva en el consumo real de combustible (Jassim et al., 2017).

La excavadora usada para este procedimiento tiene las siguientes propiedades:

El modelo 301.5 CAT se utiliza para zanjeo, con una capacidad de colmado de 44 litros. Su tiempo de ciclo es de 15 segundos, lo que equivale a 0,25 minutos, permitiendo realizar 4 ciclos por minuto, o 240 ciclos por hora.

Fórmula de productividad basada en (Trani et al):

$$Q \left[\text{m}^3/\text{h} \right] = \left(C \cdot F_c \cdot F_l \cdot F_e \cdot F_s \right) \times \frac{1}{\text{tc}[\text{h}/\text{ciclo}]}$$

En donde:

C: capacidad de cucharón (m^3)
 Fc: factor de carga (utilización)
 Fl: factor de llenado
 Fe: eficiencia horaria (paradas/maniobras)
 Fs: esponjamiento del material
 tc: tiempo de ciclo en horas (15 s = **0,004167 h**)

Remplazando:

$$\text{Volumen/ciclo} = 0.044 \times 0.80 \times 0.80 \times 0.83 \times 0.80 \times 0.78 = 0.01456 m^3/\text{ciclo}$$

$$\text{Ciclos/h} = \frac{1}{0.004167} = 240$$

$$Q = 0.01456 \times 240 = 3.50 m^3/h$$

El volumen total de material a excavar en la actividad es de 26,7 m^3 . El tiempo de duración de la actividad se obtiene realizando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{V_{\text{total}}}{Q} \Rightarrow t = \frac{26.7}{3.50} = 7.63 h \left(\approx 7.6 h \right)$$

Con el consumo de energía en términos de potencia, se calcula el gasto energético de la excavadora por horas de trabajo con la siguiente fórmula:

$$E = P_{\text{motor}} [\text{kW}] \cdot t [\text{h}] \cdot \eta_{\text{equipo}} \cdot F_{\text{carga}}$$

Remplazando:

$$E = 15.7 \times 7.6 \times 0.75 \times 0.80 = 71.6 \text{ kWh}$$

Asimismo, se debe determinar el consumo de combustible utilizado por la maquinaria. Este se calcula con base en el cuadro proporcionado por Caterpillar (2000): Consumo de combustible por hora de trabajo, en donde se elige el apartado de uso de combustible bajo, ya que este apartado está dirigido principalmente a zanjas de poca profundidad.

Para estimar el gasto energético de la maquinaria a partir de su consumo de combustible diésel, es necesario convertir los litros consumidos a energía equivalente en kilovatios-hora (kWh). El diésel presenta un poder calorífico neto promedio de 38,6 MJ/L, lo que equivale a aproximadamente 10,7–10,96 kWh/L (1 kWh = 3,6 MJ) según datos de la Agencia Internacional de Energía y reportes técnicos (Wikipedia, 2024)

Además, se debe multiplicar el valor correspondiente al consumo horario de la maquinaria, en este caso 2,5 L, respaldado por valores típicos de equipos diésel. Por ejemplo, una maquinaria de entre 1,5 y 2 toneladas presenta consumos de 2,5 a 3,6 L/h (UMAC, 2023)

$$E_{\text{kWh}} = 2.5 \text{ L} \times 10.96 \text{ kWh/L} = 27.4 \text{ kWh/h}$$

Finalmente, para determinar el Gasto Energético total de la maquinaria se suman

los valores previamente calculados, el correspondiente al consumo de combustible expresado en kWh y el asociado al resto del proceso, obteniendo así el resultado total de energía utilizada por hora de operación.

$$27.4\text{kW/h} + 70.6\text{kW/h} = 98\text{kW/h}$$

Para calcular el impacto total que genera la máquina, se multiplica el consumo final por el indicador que permite identificar el impacto generado por equipos que necesitan electricidad para su funcionamiento: 26 BV Europa (UCPTE) para bajo voltaje (<1000 Volt), según Goedkoop et al. (1999).

$$98\text{kW/h} \times 26\text{kW/h} = 2550\text{mPt}$$

Implementación de módulos fotovoltaicos en viviendas. Se han identificado cuatro tipos de viviendas basadas en su orientación con respecto al norte. La ubicación óptima de los módulos solares se determinó considerando la dirección de cada vivienda en relación con la salida del sol, garantizando resultados precisos. Utilizando el software Drj Marsh, el cual permite analizar el recorrido del sol de forma tridimensional, se realizó el estudio para cada vivienda, abarcando todo el año y llevándose a cabo en los primeros días de cada mes durante la hora pico solar, alrededor de las 12 m. Este enfoque permitió una captura máxima de radiación solar por parte de los módulos solares.

Para la implementación del sistema fotovoltaico, empleamos el software PV*SOL, especializado en diseño y simulación de sistemas solares. Este software se destaca por su capacidad para adaptar modelos tridimensionales de edificaciones a ubicaciones específicas, lo que simplifica la planificación precisa de sistemas fotovoltaicos.

El sistema seleccionado para las viviendas fue el *Sistema FV conectado a la red con consumidores eléctricos y sistemas de batería*. Posteriormente, se analizó el consumo mensual de la vivienda, mes a mes, para determinar qué sistema fotovoltaico se ajusta mejor a las necesidades.

La configuración del sistema para las primeras dos viviendas incluyó cinco módulos fotovoltaicos con una potencia total de 2,25 kWp y una superficie total de 12,9 m². Para las siguientes dos viviendas se utilizaron 4 módulos fotovoltaicos con una potencia total de 1,80 kWp y una superficie total de 10,4 m².

En cada sistema, los módulos fotovoltaicos de la marca ZNShine PV-Tech - ZX6-NH144-450/M se conectaron en serie para optimizar la generación de energía solar. Estos módulos se conectan a inversores de la marca Afore New Energy Technology, que convierten la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA), utilizada en hogares y la red eléctrica.

Los inversores también se conectan al sistema de baterías de la marca Example kW - AC Coupling - 14.45 kWh, para almacenar la energía generada por los paneles solares.

Esta conexión garantiza una carga y descarga eficientes de la energía almacenada.

Todo el sistema se conecta a la red eléctrica principal para permitir la alimentación bidireccional de energía. Durante períodos de alta generación solar, el exceso de energía se devuelve a la red eléctrica, mientras que, durante períodos de baja generación solar, la electricidad se toma de la red para satisfacer las necesidades de energía de la vivienda. Esta conexión se realiza a través de un medidor bidireccional que registra tanto la energía consumida como la energía producida.

Los resultados completos del rendimiento de las dos configuraciones fotovoltaicas se presentan en la tabla 8. En síntesis, los sistemas cubren parte de la demanda y exportan excedentes a la red. Con un reparto aproximado mitad/mitad entre configuraciones (118 y 119 viviendas), la generación anual total del conjunto es de ~802.000 kWh/año, de los cuales ~331.000 kWh/año se inyectan a la red. Tabla 8 Rendimiento total del sistema fotovoltaico en las viviendas 1,2,3 y 4

Indicador	Vivienda 1 y 2	Vivienda 3 y 4
Potencia generadora FV	2,25 kWp	1,80 kWp
Rendimiento anual específico	1.637,9 kWh/kWp	1.705,9 kWh/kWp
Coefficiente de rendimiento de la instalación (PR)	82,93 %	86,36 %
Energía de generador FV (Red CA)	3.692 kWh/Año	3.077 kWh/Año

Consumo propio directa	813 kWh/Año	513 kWh/Año
Carga de baterías	1.536 kWh/Año	1.116 kWh/Año
Inyección en la red	1.343 kWh/Año	1.448 kWh/Año
Proporción de consumo propio	63,6 %	52,8 %
Emisiones de CO ₂ evitadas	1.462 kg/año	1.010 kg/año

Fuente: Elaboración propia.

Implementación de tanques soterrados con almacenamiento para aguas pluviales.

Dado a la ubicación de la vivienda analizada como lo es la ciudad de Pasto, se propuso la implementación de tanques soterrados que permitan la captación de aguas pluviales para el consumo dentro de la vivienda, según las Cartas climatológicas del IDEAM para la estación Aeropuerto Antonio Nariño (Pasto), con un total de 1.253,1 mm/año. El cálculo mostrado en la tabla 9 se realiza para identificar la cantidad de agua lluvia que se puede coleccionar del techo de la vivienda. La tabla 10 analiza el consumo de la vivienda durante un mes y permite destacar que la cantidad de aguas lluvia acumuladas durante todo un mes en Pasto permitiría suplir las necesidades de la vivienda, esto si se tiene en cuenta que en la propuesta existen dos tanques el de captación de aguas lluvias y el tanque separador de grasas que permite reutilizar el agua de la cocina para otras actividades

Tabla 9. Cantidad de captación de agua lluvia de la vivienda

Captación de aguas pluviales						
Fórmula	Captura (Litros) = Superficie techo (m ²) * Lluvia caída (mm) * 62,6 (5% pérdidas)					
Descripción	Superficie techo	Precipitación (mm)/año	Pérdidas	Litros/año	M3/Año	M3/mes
Cantidad	71,44	1.253,1	0,95	85.045	85,01	8,5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Cálculo de consumo en toda la vivienda y mitigación

Consumo de agua	m ³ /4 Hab/ mes	Porcentaje de consumo %	Mitigación de consumo m ³ /mes	Porcentaje de mitigación %
Aseo personal	4,8	28,4		0
Descarga de sanitarios	4,8	28,4	4,8	28,4
Lavado de ropa	1,8	10,6	1,8	10,6
Cocina	3,6	21,3		
Lavado de pisos	1,2	7,1	1,2	7,1
Total	16,92	100%	7,8	50,4%
Captación de agua pluvial	8,5 m ³ /mes			
Capacidad de tanque 1 ⁷	8500 litros			
Capacidad tanque 2 ⁸	900 litros			

Fuente: Elaboración propia.

⁷ Tanque recolector de agua lluvia es el depósito *Carat XL 8.500L*, empresa GRAF.

⁸ Tanque *Separador de grasas Saphir*, empresa GRAF.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Impacto total generado por la vivienda propuesta.

Este estudio se centró en el cuidado ambiental logrado a través del uso de materiales con bajo impacto, según el eco indicador. Sin embargo, también es importante considerar los efectos sobre la salud humana y los recursos ambientales para determinar si la solución presentada cumple con los estándares de una vivienda sostenible. La elección de materiales como la madera y el panel de yeso se apoya en estudios de ACV bajo el método ReCiPe 2016 (Manan et al., 2025), los cuales evidencian que el cemento genera impactos significativos en la salud humana por su potencial cancerígeno, derivado de las emisiones durante su producción. La incorporación de panel de yeso contribuye además a mejorar el confort térmico y acústico, optimizando la eficiencia energética en climas fríos (Saez et al., 2024). Además, Eslami et al. (2024) en sus estudios demuestran que las estructuras de madera reducen el potencial de calentamiento global en un 43,5 %, disminuyen en un 15,6 % la energía primaria incorporada y ofrecen ventajas logísticas al ser un 78,6 % más livianas que la mampostería de concreto armado, evitando procesos de alta temperatura como los requeridos para el cemento Portland.

Igualmente, el uso de tejas fabricadas a partir de Tetra Pak reciclado responde a criterios de salud y sostenibilidad: el asbesto, común en cubiertas tradicionales, fue clasificado como

cancerígeno por la IARC en 1987, Según los estudios recopilados en la revisión de Negrão et al., (2020), las tejas fabricadas con material reciclado de Tetra Pak presentan buen desempeño en propiedades clave como densidad, resistencia a la flexión, absorción de agua, impermeabilidad, resistencia térmica y durabilidad, convirtiéndose en una alternativa viable para sustituir las tejas convencionales.

En cuanto a acabados, la pintura reciclada con baja emisión de VOC ha mostrado, mediante ACV con SimaPro y los métodos ReCiPe y USEtox, un mejor desempeño ambiental y en salud humana por su menor potencial cancerígeno (Ali, 2024). Adicionalmente, Paiano et al. (2021) reportan que, integrar residuos de pintura puede reducir en promedio un 48 % los impactos ambientales, fomentando la economía circular y aliviando la carga sobre los sistemas de gestión de residuos.

Finalmente, la elección de marcos de ventana en PVC reciclado, según Stichnothe & Azapagic (2013), reduce hasta un 43 % las emisiones de CO₂ y un 38 % el consumo de energía primaria frente al PVC virgen, manteniendo sus propiedades técnicas y térmicas. A escala urbana, su uso impulsa la economía circular, disminuye la presión sobre la gestión de residuos y se alinea con certificaciones como LEED o BREEAM.

Desde la perspectiva de los materiales, la propuesta ha demostrado una reducción notable en la cantidad de desechos producidos por persona.

En este sentido, es crucial evaluar el impacto inicial del terreno, previo a la construcción de una vivienda, lo cual implica considerar los residuos de desbroce. Aunque estos residuos puedan ser mínimos, todo proceso conlleva un impacto inherente, de modo que no se puede

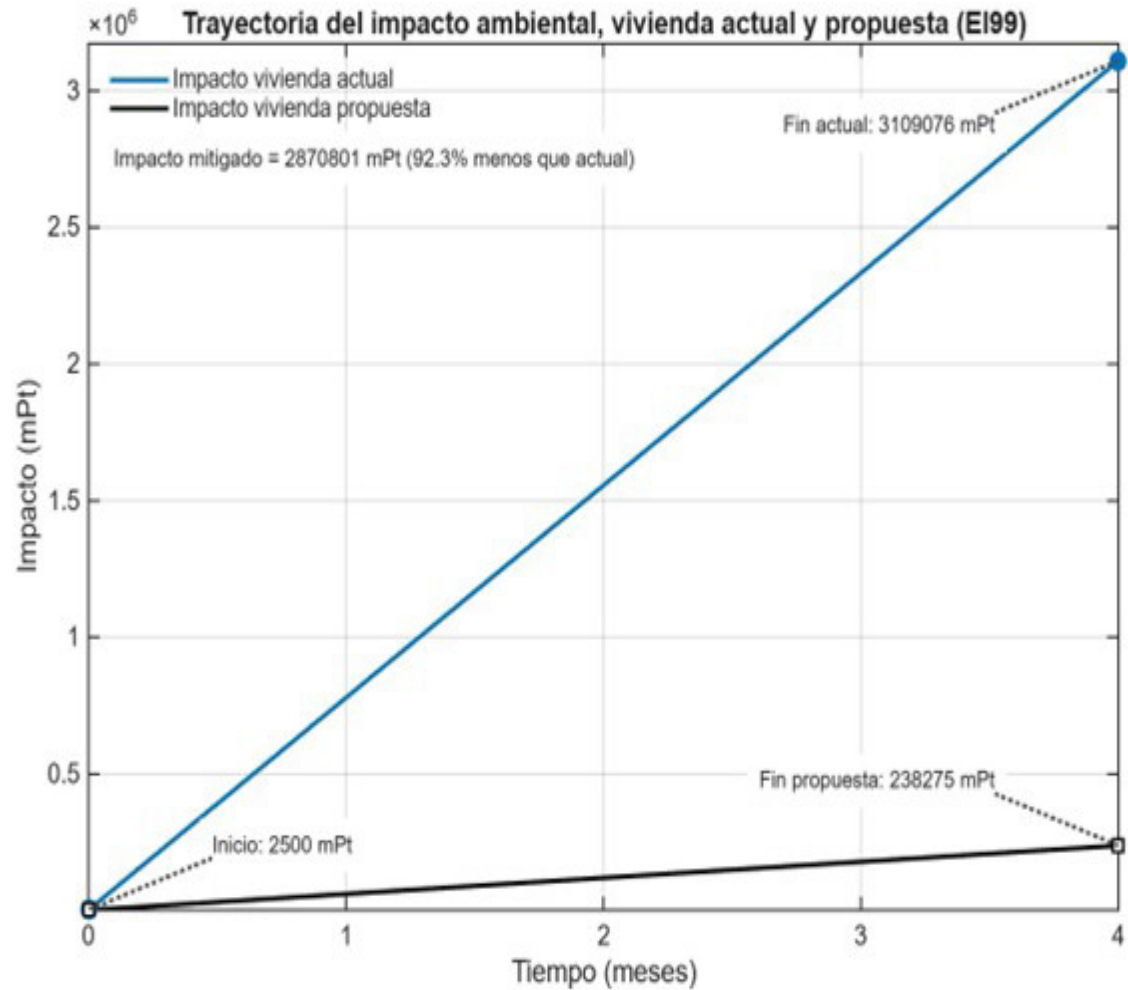
asumir un punto de partida sin impacto. Entonces, sería pertinente incluir en la guía del eco indicador un apartado específico destinado a estos procesos y residuos, tales como los escombros y la tierra de excavación.

Tabla 11 Comparación de impacto ambiental de los materiales propuestos y actuales

Comparación del impacto final de todos los materiales					
Materiales	Impacto	Porcentaje	Materiales Propuesto	Impacto	Porcentaje
Estructura en concreto	436459	14,04%	Cimentación concreto ciclópeo	87947	36,91%
Mampostería en ladrillo	742190	23,87%	Muros completos	99092	41,59%
Marcos ventanas	92641	2,98%	Marco ventanas en PVC reciclado	-17996	-7,55%
Marcos puertas	39860	1,28%	Marco puertas en madera	334	0,14%
Vidrio para ventanas	4944	0,16%	Vidrio ventanas 4mm	5242	2,20%
Pintura acrílica	272532	8,77%	Pintura	6210	2,61%
Puertas	120749	3,88%	Puertas internas y externas en madera	2228	0,93%
Cerámica	36066	1,16%	Piso laminado	1585	0,67%
Teja fibrocemento	15900	0,51%	Tejas Tetrapak	-4800	-2,01%
Estructura en acero	1279329	41,15%	Acero	50	0,02%
Suelo en concreto	87552	2,82%	Suelo en concreto	58383	24,50%
Techo superboard	12.380	0,40%	N/A	0	0%
Mortero	64.964	2,09%	N/A	0	0%
Total	3.109.076	100%	Total	238.275	100%

Fuente: Elaboración propia.

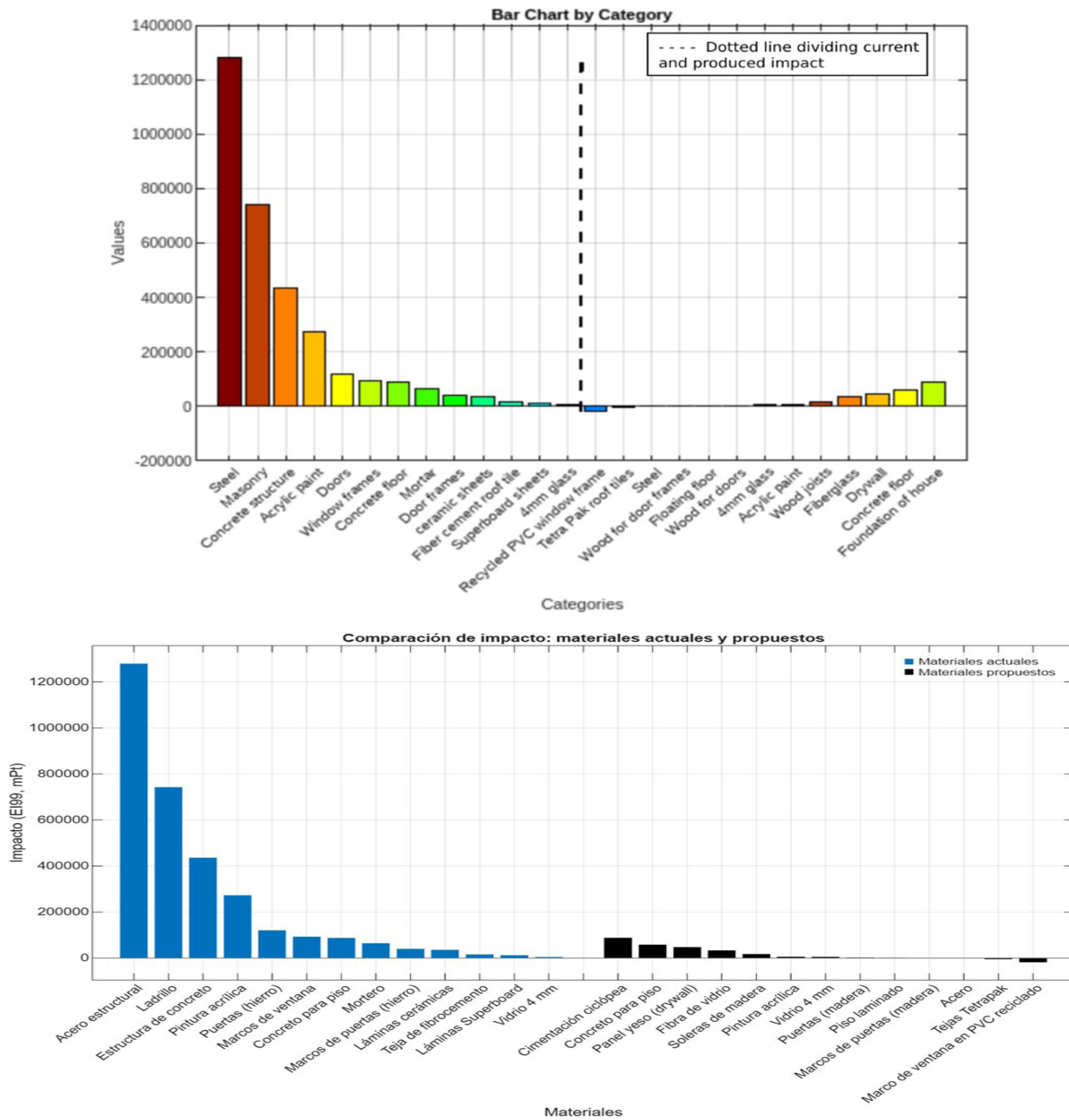
Figura.1 Comparación ambiental del impacto total en ambas viviendas de Matlab (2024)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Trayectoria del impacto ambiental acumulado (EI99, mPt) durante 0–4 meses, correspondiente al lapso estimado para la edificación de una vivienda de esta categoría. para la vivienda actual (azul) y la propuesta (negro). El eje Y inicia en 2 500 mPt; la propuesta alcanza 238 275 mPt frente a 3 109 076 mPt del escenario actual (–92,3 %).

Figura.2 Análisis del impacto material en ambas viviendas de Matlab (2024)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Comparación del impacto por material (EI99, mPt). A la izquierda se listan los materiales actuales (azul) y a la derecha los propuestos (negro), ordenados de mayor a menor dentro de cada bloque. Valores negativos indican mitigación/beneficio ambiental.

En el contexto de Pasto, caracterizado por bajas temperaturas y precipitación frecuente, la evidencia reunida indica que la configuración propuesta —madera estructural con sistema en seco y cubierta de Tetrapak reciclado— reduce la probabilidad de patologías por humedad y disminuye el mantenimiento recurrente (repintes y correcciones por corrosión), al tiempo que favorece condiciones de confort térmico y elimina compuestos de preocupación presentes en ciertas pinturas. La sustitución de componentes intensivos en emisiones por alternativas recicladas o de menor impacto, junto con la gestión diferenciada de residuos (pinturas y escombros), contribuye a una reducción neta del impacto y a mejores condiciones de salubridad. Desde una perspectiva económica exploratoria (LCC, horizonte 30 años, términos reales), la menor carga de mantenimiento y la simplificación de reparaciones propias de los sistemas en seco hacen verosímil alcanzar el umbral $\approx 9\%$ de ahorro anual respecto a un eventual sobre costo inicial, lo que sugiere conveniencia en ciclo de vida. En términos sociales, existen referentes locales de aceptación de soluciones en madera (p. ej., viviendas/cabañas en La Cocha–El Encano), y la intervención requerida para oficios en seco es

de baja complejidad. En conjunto, la propuesta se alinea con los condicionantes climáticos de Pasto, muestra plausible viabilidad económica y presenta alta adoptabilidad; no obstante, estos hallazgos son cualitativos y deberán validarse con precios locales, cronogramas de reposición y una consulta estructurada de aceptabilidad.

Limitaciones y trabajo futuro

Este análisis de viabilidad económica y social es exploratorio. No se incluyeron precios locales ni cronogramas de reposición; en consecuencia, el criterio de decisión se basó en un umbral de ahorro anual $\approx 9\%$ del eventual sobre costo inicial en un horizonte de 30 años. Como trabajo futuro, se propone un LCC cuantitativo con costos locales y tasas de descuento contextuales, un plan de reposiciones por componente (pinturas, cubiertas, carpinterías) y una consulta estructurada de aceptabilidad (encuesta Likert/entrevistas) a usuarios y constructores de Pasto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ante el constante desarrollo urbanístico de San Juan de Pasto y la creciente actividad en el sector de la construcción de viviendas, es crucial continuar investigando para evaluar el impacto ambiental que esta actividad genera. Se recomienda aplicar la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) según la normativa ISO 14040 para obtener un análisis completo.

La investigación evidencia un significativo impacto ambiental negativo en las viviendas de interés social (VIS) del barrio Carlos Pizarro en San Juan de Pasto, atribuible al empleo de materiales con elevado índice de impacto ambiental, tal como se determinó mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este fenómeno refleja la falta de guías ambientales para edificaciones sostenibles del MADS (2022)⁹, que prioricen la inversión en viviendas altamente sostenibles.

La propuesta delineada en este estudio presenta un modelo factible y aplicable que atenúa el impacto ambiental hasta en un 90%. Este enfoque se sustenta en estrategias de construcción sostenible que capitalizan recursos naturales como la irradiación solar y las aguas pluviales. Es imperativo subrayar la importancia de la consideración temprana de la sostenibilidad en todas las etapas del proceso de diseño y construcción, dado que la sinergia entre los diferentes componentes de la vivienda es fundamental para alcanzar una mitigación significativa del impacto ambiental.

Se sugiere iniciar el análisis de los materiales propuestos considerando las condiciones físicas y topográficas del área de estudio, para determinar su idoneidad. En caso de optar por nuevos materiales o replantear los existentes, se debe realizar un análisis exhaustivo de su impacto ambiental, garantizando que sea igual o menor al detectado en este estudio,

siempre que la vivienda conserve las mismas características evaluadas.

Es relevante destacar que, al emplear materiales con alto contenido reciclado no incluidos en el Eco-indicador, se debe seguir la metodología de este estudio, que valora el impacto en la maquinaria utilizada para su recuperación. Asimismo, se recomienda evaluar el impacto inicial de la construcción de cada módulo, siguiendo el enfoque de este estudio, que considera la maquinaria empleada en la preparación del terreno antes de iniciar la construcción.

REFERENCIAS

- Ali, A. A. M. (2024). Comparative life cycle assessment of wall painting types in a new city development: Impacts on environment and human health. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 5(1), 111–124. <https://doi.org/10.21608/SVUSRC.2023.226588.1159>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Tomo 2). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. https://www.andi.com.co/uploads/reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistente_636536179523160220.pdf

⁹ Guías ambientales para edificaciones sostenibles del MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)

- Audaenaert, A., De Cleyn, S. H., & Buyle, M. (2012). LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, 47, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.028>
- Betancur, S., Ortega-Ávila, N., & López-Vidaña, E. C. (2024). Strengths, weaknesses, opportunities, and threats analysis for the strengthening of solar thermal energy in Colombia. *Resources*, 13(1), 3. <https://doi.org/10.3390/resources13010003>
- Buonocore, J. J., et al. (2021). A decade of the U.S. energy mix transitioning away from coal: Historical reconstruction of the reductions in the public health burden of energy. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe74c>
- Cámara Colombiana de la Construcción. (2024). Estado de la construcción sostenible 2024 [Informe]. Bogotá, Colombia: Cámara Colombiana de la Construcción
- Chacón, A., Chamorro, J., & López, V. (2010). Diseño de un sistema modular enfocado a mejorar el espacio arquitectónico en la vivienda de interés social de Pasto [Trabajo de especialización, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano & Universidad de Nariño].
- Comfamiliar de Nariño. (2024). Proyectos viables de vivienda de interés social (VIS). <https://comfamiliarnarino.com/wp-content/uploads/2024/01/PROYECTOS-VIABLES-VIS-NUEVAENE-29-2024.pdf>
- Concejo Municipal de Pasto. (2009). Acuerdo 026 de 2009 (revisión 2017): Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pasto 2015–2027. Artículo 241. <https://concejodepasto.gov.co/wp-content/uploads/2018/02/Acuerdo-026-2009-Revision-y-Ajustes-POT.pdf>
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, Cámara Colombiana de la Construcción, & Corporación Financiera Internacional. (2020). Introducción a la construcción sostenible. <https://www.cccs.org.co/mitigacion/guia-introduccion-a-la-construccion-sostenible/>
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2021). Reporte de línea base y estado actual del sector de la edificación en Colombia con miras a edificaciones neto cero carbono. https://www.cccs.org.co/wp-content/uploads/2023/02/Estado-actual-de-la-construccion-en-Colombia-con-miras-a-una-edificacion-neto-cero-carbono_compressed.pdf
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS. (2024). Estado de la Construcción Sostenible en Colombia (2.^a ed.). https://www.cccs.org.co/wp-content/uploads/2024/07/Estado_de_la_Construccion_Sostenible_2024pdf.pdf

- Ekvall, T., Björklund, A., Sandin, G., Jelse, K., Lagergren, J., & Rydberg, M. (2020). Modeling recycling in life cycle assessment (Report No. 2020:05; IVL Report C551). IVL Swedish Environmental Research Institute. ISBN 978-91-7883-226-2.
- Eleftheriou, E., López Muñoz, L. F., Habert, G., & Zea Escamilla, E. (2022). Parametric approach to simplified life cycle assessment of social housing projects. *Sustainability*, 14(12), 7409. <https://doi.org/10.3390/su14127409>
- Eslami, H., Yaghma, A., Jayasinghe, B., & Waldmann, D. (2024). Comparative life cycle assessment of light frame timber and reinforced concrete masonry structural systems for single-family houses in Luxembourg. *Heliyon*, 10(4), e26083. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26083>
- Fan, X., & Fang, D. (2023). GHG emissions and energy consumption of residential buildings—a systematic review and meta-analysis. DOI:10.1007/s10661-023-11515-z
- Fondo Adaptación. (2015). Fondo Adaptación entregó 110 viviendas en Sandoná, Nariño. Fondo Adaptación. <https://www.fondoadaptacion.gov.co/index.php/component/content/article/172-prensa/comunicados-de-prensa/comunicados-de-prensa-2015/852-fondo-adaptacion-entrego-110-viviendas-en-sandonanarino.html>
- Goedkoop, M., Effting, S., & Collignon, M. (1999). Anexo eco indicador 99: Método para evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida. PRé Consultants B.V. & IHOBE. https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/Eco%20indicador%2099%20ca.pdf
- Haddad, A. N., Sedrez, M. M., Najjar, M. K., Hammad, A. W. A., & Soares, C. A. P. (2023). Characterising embodied energy in construction activities using energy inventory life cycle assessment method. *Buildings*, 13(1), 52. <https://doi.org/10.3390/buildings13010052>
- Hong, B., & Lü, L. (2022). Assessment of emissions and energy consumption for construction machinery in earthwork activities by incorporating realworld measurement and discreteevent simulation. *Sustainability*, 14(9), 5326. <https://doi.org/10.3390/su14095326>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (1987). Overall evaluations of carcinogenicity: An updating of IARC monographs volumes 1 to 42 (IARC Monographs Supplement 7). World Health Organization. <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-Supplements/Overall-Evaluations-Of-Carcinogenicity-An->

- Updating-Of-IARC-Monographs-Volumes-1%E2%80%931987
- Jassim, H. S. H., Lu, W., & Olofsson, T. (2017). Predicting energy consumption and CO₂ emissions of excavators in earthwork operations: An artificial neural network model. *Sustainability*, 9(7), 1257. <https://doi.org/10.3390/su9071257>
- Klanfar, Mario & Korman, Tomislav & Kujundžić, Trpimir. (2016). Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone. *Tehnicki Vjesnik*. 23. 163-169. [10.17559/TV-20141027115647](https://doi.org/10.17559/TV-20141027115647).
- Kujundžić, T., Korman, T., & Marcio, B. (2021). Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator. *Applied Sciences*, 11(5), 2345. <https://doi.org/10.3390/app11052345>
- Manan, N. H. A., Rahman, N. A. A., Hamzah, N. H., & Isa, M. H. (2025). Environmental and human health impact of recycled concrete powder: An emergy-based LCA approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1505312. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1505312>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Guía de materiales para la construcción sostenible. Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana (DAASU). ISBN 978-628-7598-12-6.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). Vivienda de Interés Social (VIS) y Vivienda de Interés Prioritario (VIP). <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda-vis-y-vip>
- Naciones Unidas. (s. f.). Población. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Negrão, J. dos S. M., Rocha, R. R. ., Santos, A. de P. L. ., Maceno, M. M. C., & Pilz, T. L. . (2020). Systematic review of literature on sustainable roof-tiles for product development. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 6(4), 0505–0512. <https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss4pp0505-0512>
- Ng, F., Harding, J. A., & Glass, J. (2016). An ecoapproach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3966. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.110>
- Paiano, A., Gallucci, T., Pontrandolfo, A., Lagioia, G., Piccinno, P., & Lacalamita, A. (2021). Sustainable options for paints through a life cycle assessment method. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126464>
- Rinne, R., Ilgin, H. E., & Karjalainen, M. (2022). Comparative study on life-cycle assessment and carbon footprint of hybrid, concrete and timber apartment buildings

- in Finland. *Buildings*, 12(8), 1122. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020774>
- Saez, V. C., Quintana-Gallardo, A., Mendiguchía-Fontes, F. A., Garzón, B. S., & Guillén-Guillamón, I. (2024). The Present and Future of the Use Phase of Social Housing in Tucumán, Argentina: An LCA Perspective. *Sustainability*, 16(12), 4958. <https://doi.org/10.3390/su16124958>
- Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2013). Life cycle assessment of recycling PVC window frames. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>
- Tijanić, K., Šopić, M., Marović, I., & Car-Pušić, D. (2019). Analysis of the construction machinery work efficiency as a factor of the earthworks sustainability. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 222, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/222/1/012009>
- Tiktin, J. (1997). Determinación de la producción de una máquina y costes (3.ª ed., pp. 42–43). EPSA Internacional, S.A., Procedimientos Generales de Construcción, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Servicio de Publicaciones.
- Trani, M. L. A., Bossi, B., Gangoellis, M., & Casals, M. (2016). Predicting fuel energy consumption during earthworks. *Journal of Cleaner Production*, 112(Part 5), 3798–3809. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.027>
- UNEP. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. United Nations Environment Programme. <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- ÜrgeVorsatz, D., et al. (2020). Advances toward a netzero global building sector. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 85–113. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045843>
- Verbitsky, O., & Pushkar, S. (2018). Eco-indicator 99, ReCiPe and ANOVA for evaluating building technologies under LCA uncertainties. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(11), 2639-2649. http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol17/full/no11/4_358_Verbitsky_14.pdf
- Wang, C., Song, J., Shi, D. et al. Impacts of climate change, population growth, and power sector decarbonization on urban building energy use. *Nat Commun* 14, 6434 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41458-5>
- Wikipedia. (2024). Energy density. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 22 de noviembre de 2024, de https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

Z. Li, T. Lin and Q. Gao, Energy Consumption Prediction of Electric Construction Machinery Based on Condition Identification, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 127461-127468, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3225681](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3225681)

Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., & Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721–3734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>