South American Publishing

SAP Land and Architecture. 2025; 4:242
doi: 10.56294/la2025242

ORIGINAL

Environmental impact in low-income housing: Sustainability strategies for impact reduction

Impacto ambiental en viviendas de interés social: Estrategias de sostenibilidad para la reducción del impacto

Nicole Valeria Cabrera Pantoja[1]

[1]Universidad CESMAG. Colombia.

Cite as
Cabrera Pantoja NV. Environmental impact in low-income housing: Sustainability strategies for impact reduction. SAP Land and Architecture. 2025; 4:242. https://doi.org/10.56294/la2025242

Publication History
Submitted: 30-09-2024
Revised: 24-01-2025
Accepted: 28-08-2025
Published: 29-08-2025

Corresponding Author
Nicole Valeria Cabrera Pantoja

ABSTRACT

The research analyzed the environmental impact of Social Interest Housing (VIS) in the Carlos Pizarro neighborhood of Pasto. The study was based on the architectural survey of a typical house, in which the masses of the materials used were calculated and evaluated using Eco-Indicator 99. The results showed that materials such as steel, brick and acrylic paint generated the greatest environmental load, with a total impact estimated at 3 109 076 millipoints. Based on this diagnosis, two improvement proposals were formulated. The first consisted of replacing the internal walls with light structures of wood, fiberglass and gypsum panels. However, the reduction achieved was only 0,6 %, which showed that partial interventions had a limited effect. The second proposal proposed a comprehensive transformation through the use of sustainable and recycled materials, such as PVC, polyaluminum and Tetrapak tiles. This redesign allowed a 92 % reduction in the initial environmental impact, demonstrating that sustainable construction strategies were effective only when applied from the beginning of the construction process. Additionally, the incorporation of photovoltaic and rainwater harvesting systems was evaluated. The solar panels guaranteed the energy supply of the houses, even with the possibility of injecting surpluses into the grid. The rainwater collection system made it possible to replace up to 71,6 % of the monthly potable water consumption, mitigating the pressure on this resource. In conclusion, the study demonstrated that sustainability in VIS was achievable through a comprehensive redesign, the selection of low-impact materials and the implementation of energy and water efficiency technologies.

Keywords: Social Housing; Sustainability; Environmental Impact; Recycled Materials; Energy Efficiency.

RESUMEN

La investigación analizó el impacto ambiental de las Viviendas de Interés Social (VIS) en el barrio Carlos Pizarro de Pasto. El estudio partió del levantamiento arquitectónico de una vivienda tipo, en el cual se calcularon las masas de los materiales empleados y se evaluaron mediante el Eco-Indicador 99. Los resultados mostraron que materiales como el acero, el ladrillo y la pintura acrílica generaban la mayor carga ambiental, con un impacto total estimado en 3 109 076 milipuntos. A partir de este diagnóstico, se formularon dos propuestas de mejora. La primera consistió en sustituir los muros internos por estructuras ligeras de madera, fibra de vidrio y paneles de yeso. Sin embargo, la reducción alcanzada apenas representó un 0,6 %, lo que evidenció que intervenciones parciales tenían un efecto limitado. La segunda propuesta planteó una transformación integral mediante el uso de materiales sostenibles y reciclados, como PVC, polialuminio y tejas Tetrapak. Este rediseño permitió reducir hasta en un 92 % el impacto ambiental inicial, demostrando que las estrategias constructivas sostenibles resultaban efectivas únicamente cuando se aplicaban desde el inicio del proceso constructivo. Adicionalmente, se evaluó la incorporación de sistemas fotovoltaicos y de captación de aguas pluviales. Los paneles solares garantizaron el abastecimiento energético de las viviendas, incluso con posibilidad de inyectar excedentes a la red. El sistema de recolección de aguas lluvias permitió sustituir hasta el 71,6 % del consumo mensual de agua potable, mitigando la presión sobre este recurso. En conclusión, el estudio demostró que la sostenibilidad en VIS era alcanzable mediante un rediseño integral, la selección de materiales de bajo impacto y la implementación de tecnologías de eficiencia energética e hídrica.

Palabras clave: Vivienda Social; Sostenibilidad; Impacto Ambiental; Materiales Reciclados; Eficiencia Energética.

© 2025; The Authors. This Open access article is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de las ciudades ha generado una presión creciente sobre los recursos naturales y el medioambiente, especialmente en contextos urbanos de países en desarrollo. Esta dinámica, impulsada por la necesidad de ofrecer soluciones habitacionales asequibles a una población en constante aumento ha derivado en un notable incremento del impacto ambiental asociado a la construcción. Paralelamente, las Viviendas de Interés Social (VIS) se presentan como una alternativa fundamental para garantizar el derecho a la vivienda, pero su desarrollo continúa ligado a métodos constructivos convencionales que implican altos costos ambientales.

En Colombia, la problemática es evidente. Según Buss[1] el sector de la construcción representa el 22 % del consumo total de energía del país, con un 16,72 % atribuido al sector residencial. Además, los edificios consumen el 79 % del suministro de agua y son responsables del 10,5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas cifras subrayan la necesidad de replantear los modelos de construcción bajo criterios de sostenibilidad.

El modelo formulado por Ehrlich et al.[2] en la década de 1970, permite comprender esta problemática al relacionar el impacto ambiental (I) con la población (P), el nivel de consumo (A) y la tecnología utilizada (T). Este enfoque evidencia la relación entre el crecimiento poblacional, el estilo de vida urbano y las prácticas constructivas en la degradación ambiental, el cambio climático y el agotamiento de recursos. Iniciativas como la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Cero Carbono (HR-ENCC) proponen metas ambiciosas, como reducir en un 30 % las emisiones operacionales para el año 2030,[3] al promover edificaciones más resilientes y saludables. En este marco, se vuelve fundamental incorporar prácticas sostenibles en la construcción de VIS, no solo para reducir su huella ecológica, sino también para garantizar mejores condiciones de habitabilidad, eficiencia energética y bienestar para sus habitantes. En esta medida, a continuación se presenta, un estudio de impacto ambiental realizado sobre viviendas tipo VIS del barrio Carlos Pizarro en la ciudad de Pasto, mediante herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Eco-Indicador 99[4] que permiten cuantificar y comparar la carga ambiental asociada a los materiales y procesos constructivos. Además, se proponen alternativas sostenibles a través del uso de materiales de menor impacto, sistemas de captación de agua pluvial y generación de energía solar que contribuyen a la mitigación durante el funcionamiento de la vivienda. La finalidad de la investigación es contribuir a la sostenibilidad en las VIS con propuestas replicables y escalables en Colombia y América Latina, a partir de mediante estrategias arquitectónicas con reducción in situ del impacto.

Cálculo del impacto ambiental a través del Eco-Indicador 99

Para el cálculo del impacto ambiental, se inició con el levantamiento arquitectónico de la vivienda mediante herramientas de medición directa y modelado tridimensional con el software Revit. Este levantamiento permitió obtener la planimetría y las dimensiones para estimar el volumen de cada uno de los materiales empleados en la construcción. A partir de estos datos, se procedió a calcular la masa de los materiales mediante la multiplicación del volumen por la densidad correspondiente, según lo estipulado en la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10.[4] El resultado permitió determinar el peso total de cada material, condición indispensable para aplicar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Posteriormente, en la evaluación del impacto ambiental se utilizó el Eco-Indicador 99, una herramienta desarrollada por Goedkoop et al.[5] que asigna valores estandarizados de impacto por kilogramo de material. La escala adoptada considera que 1 Pt equivale a una centésima parte del impacto ambiental generado anualmente por un ciudadano europeo promedio. Estos valores, expresados en milipuntos (mPt), comparan la carga ambiental de distintos componentes constructivos.

Tabla 1. Cálculo de la masa total de cada material

Material	Volumen	Densidad	Masa
Concreto	37,45 m^3	2 400 kg/m^3	89 462 kg
Ladrillo	14,24 m^3	1 850 kg/m^3	26 340 kg
Hierro para puertas	0,07 m^3	7 200 kg/m^3	498 kg
Hierro para marcos de puertas	0,02 m^3	7 200 kg/m^3	166 kg
Mortero	1,49 m^3	2 100 kg/m^3	3 120 kg
Vidrio 4mm	0,03 m^3	2 600 kg/m^3	101 kg
Pintura acrílica	1,48 m^3	1 421 kg/m^3	2 096 kg
Hierro para marcos de ventanas	0,12 m^3	7 200 kg/m^3	385 kg
Madera para marcos de ventanas	0,07 m^3	750 kg/m^3	29 kg
Madera para puertas	0,24 m^3	750 kg/m^3	179 kg
Madera para marcos de puertas	0,02 m^3	750 kg/m^3	17,6 kg
Cerámica	0,54 m^3	2 400 kg/m^3	1 288 kg
Fibrocemento para tejas	0,5 m^3	1 650 kg/m^3	795 kg
Acero para soporte estructural	0,10 m^3	7 800 kg/m^3	1 405,8 kg
Superboard para cielo raso	0,42 m^3	1 440 kg/m^3	619 kg
Concreto para piso	9,60 m^3	2 400 kg/m^3	23 040 kg

https://doi.org/10.56294/la2025242

A este respecto, la primera propuesta se centró en el uso de materiales, según valores del Eco-Indicador 99. En las siguientes tablas se presenta el cálculo de la masa total de cada material empleado y el impacto ambiental total estimado por vivienda, expresado en milipuntos (mPt) y que permite reconocer las medidas sostenibles a adoptar para reducir el impacto ambiental en las viviendas de interés social.

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

Tabla 3. Cálculo total de la masa del concreto de la vivienda, sin acero de refuerzo

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 %

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
Fibra de vidrio	Alto	25 %	49 y -15
PVC reciclado para marcos de ventanas	Alto	0 %	-170
Pintura	Alto	35 %	-240 y -720
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

En este aspecto, se plantearon dos propuestas de mejora orientadas a mitigar el impacto ambiental de la vivienda original

mediante alternativas constructivas sostenibles y materiales de menor carga ecológica. La primera propuesta consistió en intervenir únicamente los muros internos de la vivienda. Para ello, se reemplazó la mampostería tradicional de ladrillo por una estructura en madera con aislamiento de fibra de vidrio y recubrimiento en panel de yeso. Se conservaron los demás materiales de la edificación para garantizar la comparabilidad con el modelo original. A partir del nuevo esquema constructivo, se calcularon nuevamente las masas y volúmenes de los materiales modificados, así como su impacto ambiental estimado por el Eco-Indicador 99. Este procedimiento se documenta en las siguientes tablas.

Tabla 5. Cálculo de la masa de los materiales en la vivienda: primera propuesta

Material	Volumen	Densidad	Masa
Concreto para estructura	37,45 m^3	2 400 kg/m^3	89 462,74 kg
Concreto para suelo	9,60 m^3	2 400 kg/m^3	23 040 kg
Mampostería en ladrillo	18,56 m^3	1 850 kg/m^3	17 172,09 kg
Hierro para puertas	0,07 m^3	7 200 kg/m^3	498,2 kg
Mortero	1,38 m^3	2 100 kg/m^3	1 445,01 kg
Vidrio 4mm	0,03 m^3	2 600 kg/m^3	80,4 kg
Puntura acrílica	2,89 m^3	1 421 kg/m^3	2 054 kg
Madera para puertas internas	0,24 m^3	750 kg/m^3	179 kg
Baldosa para piso	0,54 m^3	2 400 kg/m^3	1 288 kg
Teja fibrocemento	0,5 m^3	1 650 kg/m^3	825 kg
Acero para estructura	0,103 m^3	7 800 kg/m^3	1 405,86 kg
Hierro para marcos de ventanas	0,12 m^3	7 200 kg/m^3	1 386 kg
Madera para marcos de puertas	0,02 m^3	750 kg/m^3	17,59 kg
Hierro para marco de puertas	0,02 m^3	7 200 kg/m^3	165,6 kg
Techo superboard	0,42 m^3	1 440 kg/m^3	603,5 kg
Soleras de madera	2,07 m^3	600 kg/m^3	1 242 kg
Panel yeso	1,09 m^3	800 kg/m^3	872 kg
Fibra de vidrio	1,65 m^3	2 600 kg/m^3	4 277 kg

Tabla 6. Cálculo del impacto ambiental total de la vivienda intervenida

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

Al reemplazar únicamente los muros internos —una práctica común en viviendas ya construidas, con el fin de conservar la estructura y la mayor parte de los materiales— se observa que el impacto ambiental se reduce solo en un 0,6 %. Esto demuestra que la mitigación del impacto es mínima, por lo que no resulta viable intervenir solo una cantidad limitada de materiales.

La segunda propuesta planteó una transformación integral de la vivienda. Se reemplazó la mayor parte de los materiales originales por opciones sostenibles. Además, se introdujeron elementos como soleras de madera, paneles de yeso, fibra de vidrio, tejas de polialuminio reciclado y marcos de ventanas en PVC reciclado, entre otros. Se sustituyeron los pisos cerámicos por laminados flotantes y se incluyó una cimentación ciclópea como alternativa de bajo impacto. El nuevo diseño fue evaluado mediante la misma metodología, y en la cual se obtuvo una reducción sustancial del impacto ambiental total respecto al modelo original.

Tabla 7. Cálculo de la masa de los materiales en la vivienda: segunda propuesta

Material	Volumen	Densidad	Masa
Soleras de madera	4,45 m^3	600 kg/m^3	2 671,8 kg
Panel yeso	6,41 m^3	800 kg/m^3	4 809,6 kg
Fibra de vidrio	7,94 m^3	2 600 kg/m^3	20 644 kg
Suelo en concreto	6,68 m^3	2 300 kg/m^3	15 364 kg
Cimentación ciclópea	10,52 m^3	2 200 kg/m^3	23 144 kg
Vidrio 4mm	0,04 m^3	2 600 kg/m^3	107 kg
PVC reciclado para marcos de ventanas	0,07 m^3	1 420 kg/m^3	106 kg
Acero	0,04 m^3	7 800 kg/m^3	0,58 kg
Madera para puertas	0,45 m^3	750 kg/m^3	337,5 kg
Madera para marco de puertas	0,07 m^3	750 kg/m^3	50,63 kg
Pintura	1,57 m^3	1 800 kg/m^3	2 217,3 kg
Tejas Tetrapak	0,59 m^3	800 kg/m^3	432 kg
Piso en lamina flotante	0,40 m^3	600 kg/m^3	240 kg

Tabla 8. 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 en lamina flotante	Madera maciza	240 kg	6,6	1 585
Total				238 275 mPt

En el caso de esta vivienda, se demostró que al reemplazar todos los materiales de construcción desde la subestructura, fue posible reducir aproximadamente el 92 % del impacto ambiental de la vivienda original. Esto evidencia que es posible alcanzar una reducción significativa del impacto, siempre y cuando la construcción de este tipo de viviendas se realice desde cero.

Además del análisis de materiales, se consideraron procesos a la valoración del reciclaje de componentes como la pintura, tomando en cuenta el gasto energético y la eficiencia del proceso industrial de recuperación.[6]

Cálculo del impacto ambiental del reciclaje de pintura

Dado que la pintura reciclada no cuenta con un valor específico en las tablas del Eco-Indicador 99, fue necesario estimar su impacto mediante un procedimiento complementario basado en las directrices del propio indicador. Se partió del valor de impacto positivo asignado a la pintura acrílica virgen, que equivale a 130 milipuntos por kilogramo, y se asumió como negativo bajo la lógica de que el reciclaje evita la producción del material original. Por tanto, el punto de partida fue un impacto de -130 mPt/kg.

A este valor se le debe restar el impacto asociado al proceso de recuperación y reintegración del material reciclado al mercado.

Para ello, se consideró el consumo energético de la maquinaria utilizada, así como su eficiencia operativa. En este caso, se analizó un mezclador industrial de pintura marca Yalian (modelo YMC-2000), cuyas especificaciones técnicas están relacionadas con la potencia del motor (5,5 kW), tiempo de operación (60 minutos) y la capacidad de producción (2 000 litros).

El rendimiento energético del proceso fue calculado al considerar el uso de la maquinaria por hora de trabajo, y aplicar los factores de eficiencia de máquina y operador extraídos de Tiktin[6]. A partir de estos parámetros, se estimó el consumo energético total necesario para procesar el volumen de pintura utilizado en la vivienda propuesta. Finalmente, se multiplicó el valor energético por el coeficiente del Eco-Indicador 99 para electricidad de bajo voltaje (<1 000 V), correspondiente a 26 mPt/kWh. El impacto ambiental neto del reciclaje de la pintura es el siguiente.

$$\frac{L\ (capacidad\ de\ producción)}{h\ (tiempo\ de\ producción)} =$$

Remplazando:

$$\frac{2000\ L}{60\ min} = \frac{2\ m3}{1h} = 2\ m3/h$$

Lo siguiente es determinar el tiempo de producción. Para ello, el volumen en esta ecuación será reemplazado por el volumen total de pintura utilizado para pintar toda la vivienda propuesta, que es de 1 570 litros, equivalentes a 1,57 m³.

V/(m3/h)

Remplazando:

(1,57 m3)/(2m3/h)=0,78h

El gasto energético de la mezcladora por horas de trabajo se calcula mediante la siguiente fórmula. El factor de eficiencia del equipo se obtuvo del cuadro Factor de eficiencia horaria de la maquinaria de Zapeter[7], donde se consideran las condiciones óptimas para esta maquinaria. La eficiencia del operador y las condiciones de la maquinaria se extrajeron del cuadro Factor de eficiencia del operador y mantenimiento,[6] en condiciones favorables.

Potencia del motor (kW)*Eficiencia del equipo *Tiempo de operación (hora)*Carga de trabajo

Remplazando:

5,5 kW*0,78*0,78h*0,80=2,5Kwh

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 (<1 000 Volt), según Goedkoop et al.[5].

2,5 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.

-130+65=-65

El valor obtenido corresponde al indicador del impacto ambiental asociado al uso de pintura reciclada, considerando los procesos involucrados en su recuperación. Este indicador permite estimar el impacto generado por la cantidad de litros utilizados en la pintura de la vivienda propuesta. Al ser negativo, el impacto al usar pintura reciclada es mitigable dadas sus condiciones.

Cálculo de impacto ambiental por el uso de excavadora en la construcción de la vivienda

Este cálculo se realiza durante el consumo energético de la maquinaria requerida para comenzar la construcción, específicamente por el uso de la excavadora. En primer lugar, se calcula el consumo de la excavadora, a partir de la fórmula indicada en el documento: Determinación del rendimiento de una retroexcavadora marca Caterpillar 420E de 94 HP para el movimiento de tierras, de Zapeter[7]. 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. La fórmula que se aplica tiene en cuenta la capacidad del cucharón (C), el factor de carga (Fc), la eficiencia horaria (E), el factor de operación y mantenimiento (FO), el factor de llenado (FG), el factor de esponjamiento (FE) y el tiempo de ciclo en segundos.

https://doi.org/10.56294/la2025242

Fórmula:

$$R = C * Fc * E * FO * FG * FE * \frac{1}{CICLO\ (seg)}$$

Remplazando:

$$R = 0{,}04 * 0{,}8 * 0{,}83 * 0{,}75 * 0{,}8 * 0{,}8 * \frac{1}{(0{,}004\ seg)} = 3{,}5 m3/h$$

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:

$$\frac{V}{m3/h}$$

Remplazando:

$$\frac{26{,}7\ m3}{3{,}5 m3/h} = 7{,}6h$$

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:

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

Remplazando:

$$15{,}7\ kW * 0{,}75 * 7{,}6h * 0{,}80 = 70{,}6 Kwh$$

Así mismo, se determina el consumo de combustible utilizado por la maquinaria. Este se calcula con base en el cuadro proporcionado por Caterpillar[8]. Para calcular el impacto de la maquinaria se tienen en cuenta dos factores, la energía medida en términos de potencia (kWh) y el combustible medido en litros. Las unidades utilizadas para el cálculo con el indicador son kWh.[9] Entonces, para convertir el consumo de combustible a kWh, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Litro\ \frac{gasoil}{(combustible\ diésel)} = 10{,}96\ kWh$$

Por lo tanto, se multiplica el consumo de combustible por esta cifra para obtener el gasto energético de la maquinaria en términos de consumo del motor:

$$2{,}5L * 10{,}96 \frac{kW}{h} = 27{,}4\ kW/h$$

Ahora, para el cálculo del Gasto Energético total se suma al valor anterior, el gasto energético del proceso de la maquinaria.

$$Consumo\ energético\ de\ proceso\ + gasto\ energético$$

Remplazando:

$$27{,}4 \frac{kW}{h} + 70{,}6 \frac{kW}{h} = 98\ kW/h$$

El impacto total que genera la máquina se obtiene al multiplicar el consumo final por el indicador que permite identificar el impacto generado por equipos que necesitan electricidad para su funcionamiento en referencia a Goedkoop et al.[5].

$$98 \frac{kW}{h} * 26 \frac{kW}{h} = 2.550\ mPt$$

https://doi.org/10.56294/la2025242

A partir del cálculo realizado, se determinó que la excavadora empleada en las primeras etapas de construcción genera un impacto ambiental total de aproximadamente 2 550 milipuntos (mPt), considerando tanto el consumo energético del proceso (medido en kWh) como el correspondiente al uso de combustible. Esta estimación se obtuvo mediante la conversión del consumo energético total a unidades de impacto utilizando el factor del Eco-Indicador 99 para equipos eléctricos de bajo voltaje. Los resultados permiten identificar la contribución significativa de la maquinaria al impacto ambiental general de la vivienda, lo que resalta la importancia de incorporar criterios de eficiencia energética desde las fases iniciales del proyecto constructivo.[10,11]

Implementación del sistema fotovoltaico

El análisis de radiación solar se realizó mediante el software DrJ Marsh, que permite simular tridimensionalmente el recorrido solar a lo largo del año. Se tomaron como referencia los primeros días de cada mes en la hora pico de radiación (alrededor del mediodía), para determinar la ubicación óptima de los módulos. Posteriormente, se diseñaron los sistemas fotovoltaicos utilizando el programa PV*SOL, especializado en modelado de instalaciones solares conectadas a la red eléctrica.

En la evaluación de la viabilidad de incorporar sistemas fotovoltaicos, se contempló cuatro viviendas con orientaciones distintas respecto al norte, lo cual permitió analizar la captación solar en función de la posición del inmueble. Cada grupo de viviendas cuenta con un número de módulos solares con diferente capacidad y área requerida teniendo en cuenta el diagnóstico previo a la proyección, así:

- Viviendas 1 y 2: cinco módulos solares con potencia total de 2,25 kWp, superficie de 12,9 m².
- Viviendas 3 y 4: cuatro módulos solares con potencia total de 1,80 kWp, superficie de 10,4 m².

La proyección para la ubicación de los módulos se representa en la siguiente figura.

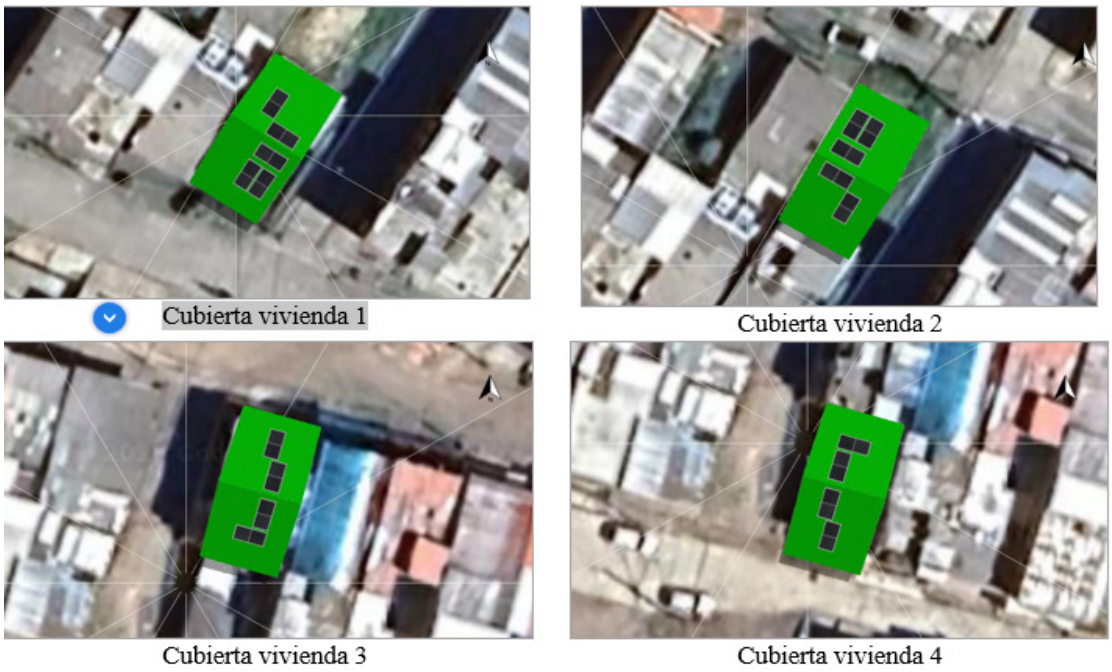

Figura 1. Proyección de las cubiertas con paneles solares para la VIS

Se recomienda que los módulos solares cuenten con estas características para garantizar la eficiencia dentro de la VIS, módulos de marca ZNShine PV-Tech (modelo ZXM6-NH144-450/M), conectados en serie a inversores Afore New Energy Technology, responsables de transformar la corriente continua generada por los módulos en corriente alterna utilizable con baterías de almacenamiento (Example kW, 14,45 kWh).

Captación y aprovechamiento de aguas pluviales

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

Captación de aguas pluviales						
Fórmula	**Captura (Litros) = Superficie techo (m²) * Lluvia caída (mm) * 0,95 (5 % pérdidas)**					
Descripción	**Superficie techo**	**Precipitación (mm)/año**	**Pérdidas**	**Litros/año**	**M³/Año**	**M³/mes**
Cantidad	71,44	1 710	0,95	110 6054,3	116,3	9,67

Además del enfoque en materiales sostenibles y eficiencia energética, se incorporó una estrategia para el uso responsable del recurso hídrico, centrada en la captación de aguas lluvias. Esta solución responde a la necesidad de reducir el consumo de agua

potable en actividades domésticas no esenciales, y a la vez, mitigar el impacto ambiental asociado al ciclo del agua en contextos urbanos. El cálculo de la cantidad de agua lluvia disponible para captación se basó en la superficie de cubierta de la vivienda y los datos de precipitación media anual en la ciudad de Pasto. Se aplicó la fórmula establecida para este tipo de sistemas, considerando un factor de pérdida del 5 %, lo que permitió determinar el volumen mensual potencial de almacenamiento.

Con base en esta estimación, se diseñó un sistema de almacenamiento mediante tanques soterrados de diferentes capacidades, junto con una red de distribución interna que permite el uso del agua recolectada en actividades como el riego, lavado de pisos y descargas sanitarias. Para complementar este análisis, se realizó un balance del consumo mensual típico de una vivienda de cuatro habitantes. Se identificaron los puntos donde es posible sustituir el agua potable por agua lluvia o aguas grises.

Tabla 10. Cálculo de consumo en toda la vivienda y porcentaje de 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	0,9	21,3
Lavado de pisos	1,2	7,1	1,2	7,1
Riego de jardines	0,72	4,3	0,72	4,3
Total	16,92	100 %	8,52	71,6 %
Captación de agua pluvial	9,67 m^3/mes			
Capacidad de tanque 1	8500 litros			
Capacidad tanque 2	900 litros			

Las medidas contribuyen a una reducción significativa en el uso de agua potable y promueven una gestión más sostenible del recurso, alineada con los principios de la arquitectura ambientalmente responsable. En particular, se logra mitigar hasta el 71,6 % del consumo mensual de agua mediante el aprovechamiento de aguas pluviales, lo que equivale a 8,52 m^3/mes que pueden cubrir actividades como el riego, lavado de pisos, cocina, lavado de ropa y descarga de sanitarios.

Reducción del impacto en la vivienda de interés social

La evaluación del modelo base de la vivienda VIS evidenció un impacto ambiental significativo, reflejado en un total de 3 109 076 milipuntos según el Eco-Indicador 99 (tabla 3). Este valor representa la carga ambiental asociada a los materiales empleados en su construcción, se destacan componentes como el acero, el ladrillo cerámico y la pintura acrílica como los de mayor incidencia.

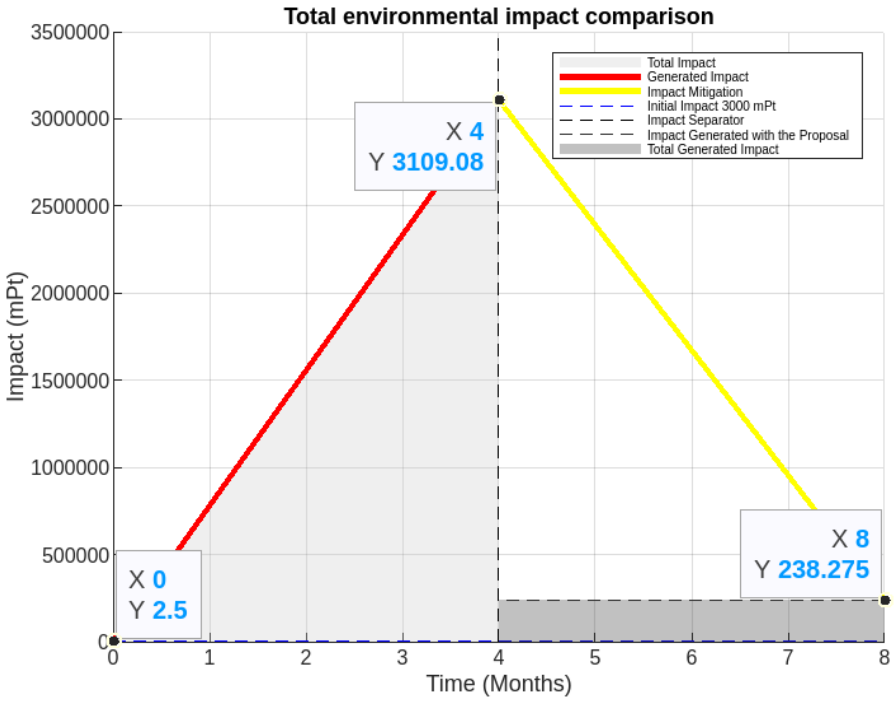

Figura 2. Comparación ambiental del impacto total en ambas viviendas

A partir de este diagnóstico, se formularon dos propuestas de intervención. La primera, de alcance parcial, se centró en la sustitución de los muros internos por una estructura más ligera, compuesta por madera, aislamiento de fibra de vidrio y panel de yeso. Esta modificación, si bien mantuvo el resto de los materiales originales, permitió una reducción del impacto ambiental del 0,6 %, con un ahorro estimado de 11 835 milipuntos respecto al modelo inicial. Por otro lado, la segunda propuesta supuso un rediseño integral de la vivienda con enfoque sostenible. Al integrar materiales reciclados y de menor huella ambiental como PVC reciclado, polialuminio, madera laminada y cimentación ciclópea. Se alcanzó una reducción de 2 870 801 milipuntos, equivalente al 92 % del impacto ambiental total del modelo original.

Los beneficios de estas transformaciones adquieren aún mayor relevancia al ser proyectados a escala barrial. Si se replicaran estas medidas en las 237 viviendas del barrio Carlos Pizarro, se podría evitar la generación de más de 56 000 toneladas de residuos en un periodo de seis meses, una cifra considerable al compararse con las 270 000 toneladas mensuales que produce una ciudad como Bogotá. Las siguientes gráficas permiten visualizar de forma comparativa la evolución del impacto ambiental en cada escenario. La curva correspondiente a la vivienda original refleja una carga ambiental creciente durante el proceso constructivo. En contraste, las curvas de las viviendas mejoradas muestran una tendencia claramente descendente, que evidencian la eficacia de las modificaciones planteadas.

Por otro lado, el impacto de cada material es más significativo en la vivienda actual. La línea punteada indica el cambio de materiales por aquellos propuestos y que demuestran la mitigación de los efectos.

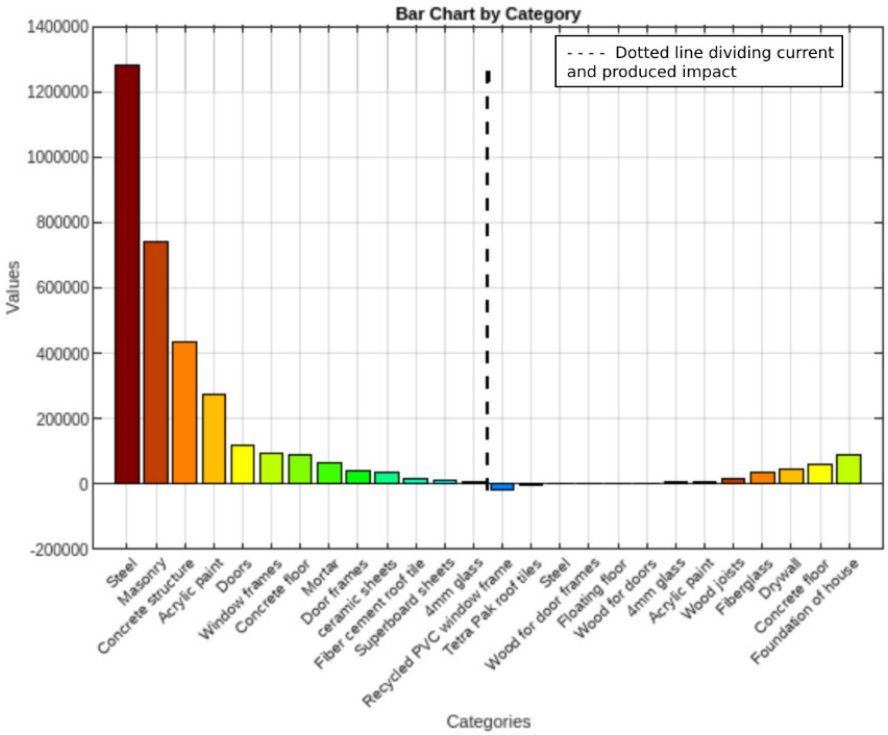

Figura 3. Análisis del impacto material en ambas viviendas

CONCLUSIONES

La evaluación ambiental de la vivienda de interés social estudiada demuestra que es posible reducir de forma significativa su impacto mediante decisiones acertadas en el diseño y selección de materiales. A través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el uso del Eco-Indicador 99 se identificaron los elementos constructivos con mayor carga ambiental y se propusieron alternativas sostenibles que conservan la funcionalidad del espacio habitacional. Los resultados obtenidos evidencian que la simple modificación de ciertos componentes, como los muros internos, ya genera beneficios medibles, mientras que una transformación completa de la vivienda puede reducir hasta en un 90 % el impacto ambiental total. Adicionalmente, la inclusión de sistemas como la captación de aguas pluviales y la generación de energía solar refuerza el carácter integral de la propuesta. Estas soluciones permiten disminuir el consumo de recursos convencionales, generar excedentes energéticos y promover una gestión más responsable del entorno.

La implementación de sistemas fotovoltaicos aportó resultados significativos en términos de eficiencia energética. La capacidad de los sistemas no solo cubrió el consumo doméstico mensual, sino que también permitió la inyección de excedentes a la red eléctrica. Esto refuerza el valor agregado de combinar medidas pasivas (materiales sostenibles) con soluciones tecnológicas activas (energía renovable). Se recomienda que futuras iniciativas de vivienda social incorporen desde etapas tempranas herramientas de evaluación ambiental, como el ACV, adaptadas a la realidad local. En el caso de incorporar insumos no contemplados por el Eco-Indicador 99, es clave valorar su impacto a través del análisis energético de los procesos de recuperación y producción. Este enfoque -implementado en el presente estudio para el caso del reciclaje de pintura y el uso de maquinaria- ofrece una vía confiable para integrar nuevas soluciones. Finalmente, este trabajo plantea una hoja de ruta replicable para otros contextos urbanos en Colombia y América Latina, contribuyendo a que la vivienda de interés social evolucione hacia modelos más sostenibles, resilientes y

comprometidos con el bienestar colectivo.

FINANCIACIÓN
Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES
Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA
Conceptualización: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Curación de datos: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Análisis formal: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Investigación: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Metodología: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Administración del proyecto: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Recursos: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Software: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Supervisión: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Validación: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Visualización: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Redacción – borrador original: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.
Redacción – revisión y edición: Nicole Valeria Cabrera Pantoja.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
1. Buss A. ¿Cómo afrontar el impacto ambiental desde el sector de la construcción? Camacol Valle. 2021. https://revistandc.camacolvalle.org.co/impacto-ambiental-el-sector-constructor/

2. Ehrlich PR, Holdren JP. Impact of population growth. Science, 171(3977), 1212–1217. 1971. https://doi.org/10.1126/science.171.3977.1212

3. Landaeta AM, Ospina A, Lizcano JD, Arroyave N, Jiménez MA, Ferro M, Carreño T, Zuluaga V. Estado de la construcción sostenible en Colombia. 2024. https://www.cccs.org.co/wp/wp-content/uploads/2024/07/Estado_de_la_Construccion_Sostenible_2024pdf.pdf

4. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Tomo 2). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010.

5. Goedkoop M, Effting S, Collignon M. Eco-indicador 99: Método para evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida. PRé Consultants B.V. & IHOBE. 1999 https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/Eco%20indicador%2099 %20ca.pdf

6. Tiktin J. Determinación de la producción de una máquina y costes (3ª ed., pp. 42–43). EPSA Internacional, S.A. / E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones. 1997.

7. Zapeter C. Determinación del rendimiento de una retroexcavadora marca Caterpillar 420E de 94hp para el movimiento de tierras [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Digital. 2017. https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/11008/1/TUAIC_2017_IC_CD0065.pdf

8. Caterpillar Inc. Manual de rendimiento (31.ª ed., p. 947, Serie SSBD0341). Caterpillar Inc. 2000. https://es.slideshare.net/slideshow/manual-rendimiento-maquinaria-pesada-caterpillar/32754253

9. Ecoembes. Los efectos en el medioambiente de la electricidad. 2023. https://reducereutilizarecicla.org/medioambiente-electricidad/

10. Avendaño A. Introducción a la construcción sostenible. Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. 2020. https://www.cccs.org.co/wp/mitigacion/guia-introduccion-a-la-construccion-sostenible/

11. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. Vivienda de interés social – SGR. Colombia potencia de vida. 2017. https://minvivienda.gov.co/ministerio/planeacion-gestion-y-control/sistema-general-de-regalias/lineamientos-para-presentacion-de-proyectos/vivienda-de-interes-social-sgr