



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

**IMPACTO AMBIENTAL EN DOS SISTEMAS
CONSTRUCTIVOS PARA VIVIENDAS DE
INTERÉS SOCIAL A PARTIR DEL
PRESUPUESTO: UN ANÁLISIS COMPARATIVO
EN SAN ANDRÉS DE TUMACO**

ENVIRONMENTAL IMPACT OF TWO CONSTRUCTION
SYSTEMS FOR SOCIAL HOUSING BASED ON BUDGET: A
COMPARATIVE ANALYSIS IN SAN ANDRÉS DE TUMACO

Willian Solís Pérez

Universidad del Pacífico - Colombia

Iván Fernando Otalvaro Calle

Pontificia Universidad Javeriana Cali - Colombia

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15268

Impacto ambiental en dos sistemas constructivos para viviendas de interés social a partir del presupuesto: un análisis comparativo en San Andrés de Tumaco

Willian Solís Pérez¹wisope@unipacifico.edu.co<https://orcid.org/0000-0003-3835-1423>Universidad del Pacífico
Colombia**Iván Fernando Otalvaro Calle**ifotalvaro@javerianacali.edu.co<https://orcid.org/0000-0003-3665-4244>Pontificia Universidad Javeriana Cali
Colombia

RESUMEN

En el desarrollo de proyectos de construcción, frecuentemente se seleccionan alternativas basadas en sus costos. Sin embargo, la presión que ejercemos sobre el planeta y sus recursos nos obliga a considerar como alternativas aquellas de menor impacto ambiental. Para obtener criterios que involucren el impacto ambiental, en este proyecto se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva que permitió identificar la huella ecológica (HE) como un indicador de evaluación de impacto que integra el uso de fuentes primarias y secundarias centradas en la estructura de costos. La HE evalúa la demanda humana sobre los recursos, expresada en el área de tierra necesaria para producir los productos que consumimos y absorber los residuos, y se expresa en unidades de superficie globales (hectáreas globales, hag). Esta metodología se empleó en el presente trabajo para evaluar el impacto ambiental durante la fase de construcción de un proyecto de vivienda de interés social, ejecutado en la ciudad de San Andrés de Tumaco, en la costa nariñense, comparando dos alternativas constructivas: el sistema constructivo convencional de mampostería confinada y el sistema con formaleta tipo túnel Outinord. Los resultados mostraron que el sistema constructivo convencional produce un mayor impacto en comparación con el sistema Outinord, con índices de 0,0794 y 0,0617 hag/m² respectivamente, demostrando que este último es una alternativa apropiada en función de su huella ecológica total y la posible reducción en el tiempo de obra.

Palabras claves: evaluación ambiental, huella de carbono, huella ecológica, energía embebida, sistemas constructivos

¹ Autor principal.

Correspondencia: wisope@unipacifico.edu.co

Environmental Impact of Two Construction Systems for Social Housing Based on Budget: A Comparative Analysis in San Andrés de Tumaco

ABSTRACT

In the development of construction projects, alternatives are often selected based on their costs. However, the pressure we exert on the planet and its resources forces us to consider alternatives with lower environmental impact. To establish criteria that involve environmental impact, this project carried out an exhaustive literature review that identified the ecological footprint (EF) as an impact evaluation indicator that integrates the use of primary and secondary sources focused on cost structure. The EF evaluates human demand on resources, expressed in the area of land needed to produce the products we consume and absorb the waste, and is expressed in global hectares (gha). This methodology was employed in the present work to evaluate the environmental impact during the construction phase of a social housing project, executed in the city of San Andrés de Tumaco on the Nariño coast, comparing two construction alternatives: the conventional confined masonry construction system and the tunnel formwork system Outinord. The results showed that the conventional construction system produces a greater impact compared to the Outinord system, with indices of 0.0794 and 0.0617 gha/m² respectively, demonstrating that the latter is an appropriate alternative in terms of its total ecological footprint and the possible reduction in construction time.

Keywords: environmental assessment, carbon footprint, ecological footprint, embedded energy, construction systems

Artículo recibido 02 noviembre 2024

Aceptado para publicación: 08 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

La selección de un sistema constructivo debe de contemplar en la actualidad un análisis multicriterio que incluya aspectos económicos, ambientales y sociales, es común que en Colombia esta selección se centre en el costo total del proyecto, el retorno de la inversión, la financiación y la optimización de recursos, en un segundo plano se consideran factores técnicos como la facilidad de construcción y su mantenimiento y en raras ocasiones se incluyen aspectos ambientales como el impacto ambiental del sistema. Esto se debe de manera frecuente a el desconocimiento de metodologías simples de estimación de impactos en las compañías constructoras del país. Es por ello que surge el presente estudio, con el objeto de evaluar metodologías simples que permitan obtener indicadores de impacto ambiental como criterio de selección de sistemas constructivos que pueden apoyarse en el presupuesto del proyecto (Wszolek et al., 2014; Freire & Marrero, 2015). Este trabajo surge como una contribución al compromiso adquirido por el gobierno de Colombia a fomentar la investigación en energía limpia para 2030 (ONU, 2015), así como a la necesidad de contar con alternativas rápidas que enriquezcan los criterios de decisión.

La construcción genera un impacto ambiental considerable, principalmente en emisiones de CO₂ y consumo de materiales (Gieseke et al., 2014; Gómez, 2019). En este contexto, el marco metodológico propuesto en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) surge como una herramienta útil para evaluar el impacto ambiental de los proyectos de construcción. Las etapas del ACV desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida proveen un marco conceptual para estimar indicadores de impacto ambiental como la Huella de Carbono (HC), Energía Embebida (EE) y Huella Ecológica (HE), lo que lo convierte en una opción adecuada para la selección del sistema constructivo y el diseño de edificaciones eficientes y económicamente viables (Méndez & Burgos, 2008; Ros García & Sanglier Contreras, 2017). Como una respuesta desde la investigación en los últimos años han surgido diferentes herramientas en línea cuyo propósito es facilitar la cuantificación de los impactos (Khan et al., 2018; Sesana & Salvalai, 2013; Vasquez & Quesada, 2017; González, 2018).

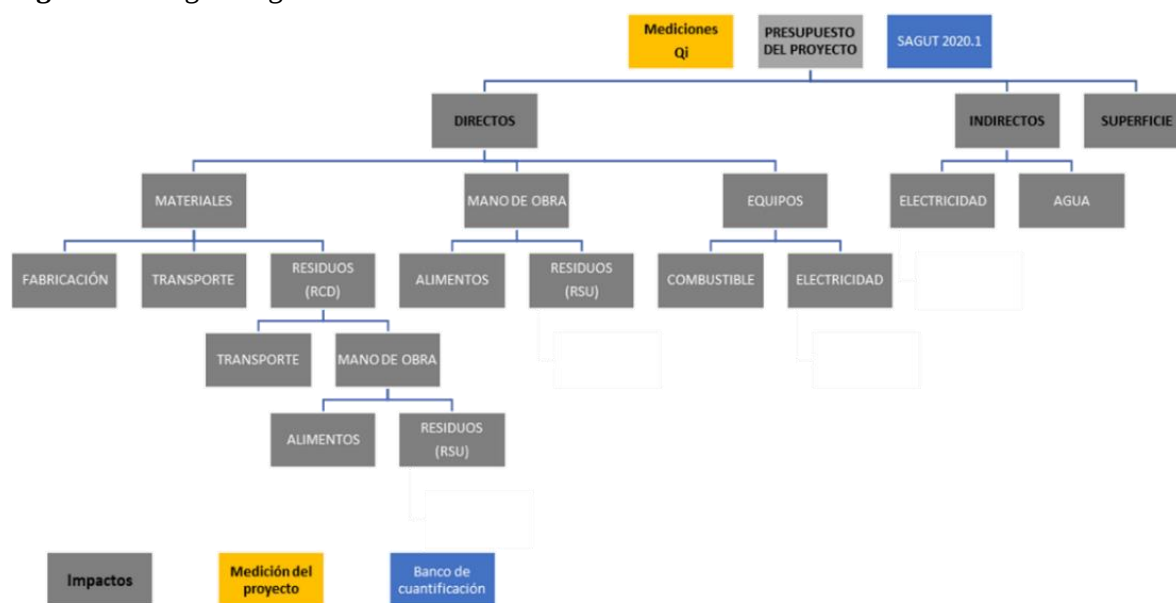
El presente estudio analiza alternativas basadas en la estructura de costos para evaluar indicadores ambientales de dos sistemas constructivos de vivienda de interés social en San Andrés de Tumaco, Nariño, utilizando datos del presupuesto del proyecto.

METODOLOGÍA

Introducción a la metodología

La metodología simplifica los métodos analizados en la revisión bibliográfica, considerando variables imprevistas en el cálculo de la HE. Se basa en el marco teórico proporcionado por Solís (2010), Freire (2017), Rivero (2020) y González (2017), y se ejemplifica con un estudio de caso para estimar los indicadores de impacto mediante el ACV. Se sugiere ampliar el cálculo de la EE para incluir el consumo de energía de las máquinas en la obra y de la mano de obra, además de los materiales de construcción, que puede representar un porcentaje significativo del consumo total. La HE se calcula principalmente siguiendo las metodologías propuestas por Freire (2017) y Rivero (2020).

Figura 1: Diagrama general de cálculo de indicadores

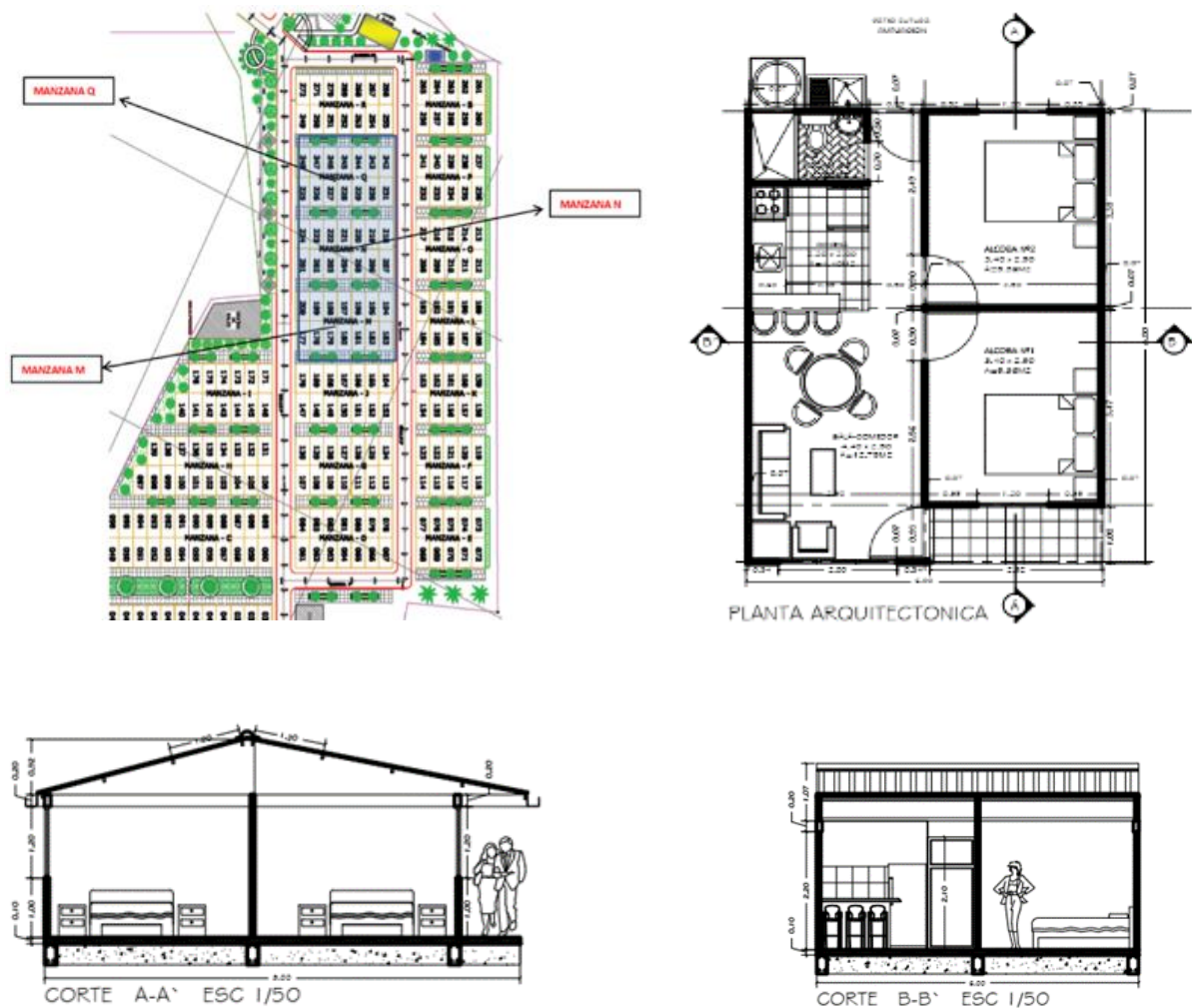


Fuente: adaptación de (Freire, 2017)

Estudio de caso

Se consideró el proyecto de vivienda de interés social en San Andrés de Tumaco ($1^{\circ}48'24''N$ $78^{\circ}45'53''O$) en Colombia. Consiste en viviendas de un piso en sistema outinord en muros portantes de concreto reforzado con espesor no mayor a 8cm. Se construyeron por módulos de 2 unidades, 72 viviendas en 4 meses (entre octubre de 2014 y febrero de 2015), con mano de obra local.

Figura 2: Planimetría



Fuente: adaptación de (Mosquera, 2014)

Se utilizó la estructura de desglose de trabajo (EDT) para analizar las cantidades de obra y materiales, definiendo una estructura hasta el tercer nivel de desagregación, donde las unidades básicas de estudio (UBE) se encuentran en el último nivel.

Tabla 1: Resultados del cálculo de cantidades de obra sistema outinord

2 ENCERRAMIENTOS SISTEMA OUTINORD			
2.1.	SISTEMA OUTINORD MUROS DE CARGA EN CONCRETO E=8cm POR MÓDULO / 164,63m ²	m ²	164,63
A2,01	Muros de carga en Sistema Outinord E=8cm	m ²	162,23
A2,02	Mesones	m ²	2,4
2.2.	CUBIERTA EN FIRBO-CEMENTO POR MÓDULO (2 UVIS) A=122m ²	UND	1
A2,03	Cubierta en teja X Vivienda 61m ²	UND	2
A2,04	Bajante de aguas lluvias	ml	12

A2,05	Estructura de cubierta metálica	UND	2
2.3.	CARPINTERÍA POR MÓDULO (2 UVIS)	UND	1
A2,06	Ventana Metálica 1,20mX1,20m V1	UND	4
A2,07	Ventana Metálica 2,00mX1,20m V2	UND	2
A2,08	Ventana Metálica 0,75mX0,30m V3	UND	2
A2,09	Puerta en madera para baño 0,70mX2,10m	UND	2
A2,10	Puerta en madera 0,90mX2,10m Según diseño	UND	4
A2,11	Puerta metálica 0,90mX2,10m Según diseño	UND	4
1	CIMENTACIÓN		
1.1.	CIMENTACIÓN EN VIGA 20CMX40CM DE CONCRETO DE 3100 PSI REFORZADO POR MÓDULO / 80,54ml	ml	80,54
A1,01	Viga perimetral de cimentación de 0,20mX0,35m	ml	80,54
1.2.	LOSA DE CONTRAPISO POR MÓDULO E=10cm / 96m²	m²	96,00
A1,02	Subbase C5	m ³	19,2
A1,03	Relleno para cimentación con material importado	m ³	4,64
A1,04	Piso en concreto 2500 PSI	m ²	96,00
3	REDES		
3.1.	INSTALACIONES SANITARIAS POR MÓDULO (2 UVIS)	UND	1
A3,01	Cajas inspección	UND	4
A3,02	Instalaciones Sanitarias X Vivienda	UND	2
3.2.	INSTALACIONES HIDRÁULICA POR MÓDULO (2 UVIS)	UND	1
A3,03	Instalaciones Hidráulicas X Vivienda	UND	2
A3,04	Combo sanitario línea económica	JGO	2
3.3.	INSTALACIONES ELÉCTRICAS POR VIVIENDA	UND	2
A3,05	Instalaciones Eléctricas X Vivienda	UND	2

Tabla 2: Resultados del cálculo de cantidades de obra sistema convencional

2 ENCERRAMIENTOS SISTEMA CONVENCIONAL			
2.1.	SISTEMA CONVENCIONAL MUROS	m²	139,24
	CONFINADOS CON COLUMNETAS Y		
	VIGUETAS POR MÓDULO / 164,63m²		
A2,01	Muro ladrillo soga sucio	m ²	139,24
A2,02	Columneta de confinamiento	ml	51,32
A2,03	Viga de amarre de muro en concreto 10-12x20cm	ml	78,95
A2,04	Viga de amarre muro culata en concreto 10-12x20cm	ml	37,39
A2,05	Acero de refuerzo flejado 60000 PSI 420Mpa	kg	347,41
A2,06	Repello muro 1:3	m ²	191,08
A2,07	Mesones	m ²	2,4

A partir de estos resultados y con ayuda del software SAGUT 2020.1 se definieron (con la base de datos del programa) los rendimientos de obra y de consumo de materiales que determinaron las cantidades finales.

Huella de carbono (HC)

La Huella de Carbono (HC) surge como una simplificación del ACV, centrándose exclusivamente en la medición de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por individuos, organizaciones o productos (Ihobe, 2009). Se adaptó el procedimiento propuesto por Gómez (2019) basándose en el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (Encord, 2012) y considerando fuentes del tercer alcance. Se calculó la huella teniendo en cuenta el alcance del ACV "*de la cuna a la construcción*", agrupando materiales por familias (Benveniste et al., 2011), utilizando la fórmula general de (Sinha et al., 2016).

$$\text{kg CO}_2 \text{ eq} = \sum QM_j \cdot FEM_j + \sum DT_j \cdot QM_j \cdot FET_i$$

Donde, QM_j = es la cantidad del material j ; FEM_j es el factor de emisión por la extracción, manufactura y producción del material j ; DT_j es la distancia de transporte del material j desde el punto de fábrica hasta la obra; y FET_i es el factor de emisión por transporte de acuerdo con el medio i .

Los factores de emisión utilizados fueron obtenidos a partir de la revisión bibliográfica y se encuentran consignados en la Tabla 3.

Tabla 3: Factores de emisión para cálculo de HC (kg*CO₂eq/kg)

DESCRIPCIÓN	FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂ eq (kg*CO ₂ eq / kg)						F.E.
ACERO	2,750 ^a	2,700 ^b	2,800 ^c	2,890 ^d	2,710 ^e	1,800 ^f	2,608
AGUA	0,002 ^g	0,000 ^h					0,001
COBRE	3,830 ^a	8,622 ^b	1,850 ⁱ				4,767
ASBESTO CEMENTO	0,691 ^k	0,052 ^b	0,909 ^l	0,723 ^j			0,594
ÁRIDOS	0,005 ^a	0,010 ^b	0,007 ^m		0,016 ⁿ	0,003 ^k	0,008
CEMENTO	0,830 ^a	1,185 ^b	0,980 ^c	0,918 ^o		1,226 ^p 0,758 ^k	0,983
HIERRO GALVANIZADO	2,820 ^a	3,789 ^l	4,906 ^k	5,230 ^j			4,186
ICOPOR	2,700 ^a		3,930 ^q			2,901 ^k	3,177
LADRILLO COMÚN	0,220 ^a	0,243 ^b		0,240 ^d	0,230 ^e		0,233
MADERA	0,460 ^a				0,300 ^e		0,380
MORTERO 1:3	0,191 ^r	0,193 ^z	0,213 ^a				0,199
MORTERO 1:4	0,471 ^r	0,163 ^z	0,177 ^a				0,270
HORMIGÓN 1:2.5:4« 2500 PSI-17.5MPa	0,096 ^a	0,056 ^r					0,076
HORMIGÓN 1:2:3 3100 PSI 21MPa	0,129 ^a			0,107 ^d	0,150 ^s	0,113 ^s	0,125
PINTURA	3,560 ^a	0,408 ^b				0,900 ⁿ 3,640 ^m 2,212 ^k	2,144
PVC	2,410 ^a		2,940 ^u	3,100 ^d	3,200 ^w	1,835 ⁱ 2,080 ^q	2,594
TRANSPORTE DE CARGA	0,150 ^a	0,103 ^t	0,133 ^u	0,136 ^v	0,078 ^x		0,120
PORCELANA	1,480 ^a	0,860 ^v	2,258 ⁱ				1,533

Referencias: ^a G. P. Hammond & Jones, (2008); ^b ECOINGENIERÍAS et al., (2012); ^c Cang et al., (2020); ^d Geoffrey Hammond et al., (2011); ^e Cabeza et al., (2021); ^f Cadavid M, (2014); ^g Méndez & Burgos, (2008); ^h Rivero-Camacho, (2020); ⁱ Freire et al., (2016); ^j Rivero-Camacho, (2020); ^k Freire et al., (2016); ^l Núñez B, (2019); ^m Méndez & Burgos, (2008); ⁿ Fernanda et al., (2021); ^o De Carvalho Filho, (2001); ^p Wszolek et al., (2014); ^q Freire, (2017); ^r Freire & Marrero, (2015); ^s Cabeza et al., (2021); ^t Gómez, (2019); ^u Nadoushani & Akbarnezhad, (2015); ^v CAR et al., (2013); ^w Christoforou et al., (2016); ^x Carrasco L, (2015); ^y Zabalza Bribián & Aranda Usón, (2011).

Energía Embebida (EE)

La energía embebida de un material de construcción abarca desde su extracción hasta su incorporación en el edificio, incluyendo transporte y parte de los equipos necesarios (Muñoz & Quiroz, 2014). Su control promueve el uso de materiales renovables o reciclables (Marrero et al., 2013). Evaluar el consumo energético en el ciclo de vida de la edificación es crucial para objetivos cuantificables, considerando los consumos directos y la energía en los componentes de las unidades de obra (Solís-Guzmán et al., 2013; González et al., 2015), controlando indicadores como la huella ecológica y de

carbono (Solís-Guzmán et al., 2014). Se adaptó el procedimiento propuesto por Gómez (2019), utilizando el protocolo de Gases de Efecto Invernadero (Encord, 2012). Se calculó la energía embebida considerando la ecuación de (Sinha et al., 2016):

$$MJ = \sum QM_j \cdot FEM_j + \sum Pot_j \cdot TU_j \cdot FC$$

Donde, QM_j = es la cantidad del material j ; FEM_j es el factor de emisión por la extracción, manufactura y producción del material j ; Pot_j es la potencia de la maquinaria j empleada; TU_j es el tiempo de uso de maquinaria j en los trabajos de obra; y FC es el factor de conversión para cambio de unidades (MJ/kWh).

Los factores de emisión utilizados fueron obtenidos a partir de la revisión bibliográfica (Tabla 4).

Tabla 4. Factores de emisión de EE (MJ/kg)

DESCRIPCIÓN	FACTOR DE EMISIÓN DE ENERGÍA EMBEBIDA (MJ/Kg)										F.E.
Acero	29,02 ^a	35,40 ^c	35,30 ^b	21,50 ^d	36,00 ^e	32,00 ^f	32,68 ^g	42,00 ^h	33,33 ⁱ		33,03
Agua	0,06 ^j	0,05 ^k	0,010 ^l								0,040
Cobre	109,17 ^j	40 – 55 ^b	110,20 ^m	42,00 ⁿ	50,40 ^o	110,00 ^l	98,93 ^p				86,78
Fibro Cemento	7,40 ^q	8,86 ^p	10,70 ^r								8,99
Áridos	0,10 ^j	0,01 ^e	0,15 ^j	0,22 ^b							0,12
Cemento	7,80 ^j	7,92 ^e	7,79 ^m	7,00 ^s	8,98 ^t	5,56 ^j	5,85 ^h	6,85 ^l	4,54 ^u		6,92
Hierro Galvanizado	34,80 ^v	22,60 ^c									28,70
Poliestireno expandido	105,00 ^v	82,60 ^w	89,50 ^r								92,37
Ladrillo Común	4,95 ^w	2,90 ^j	3,00 ^c	4,75 ^h	4,04 ^x	2,70 ^y	2,75 ^p				3,58
Madera	5,18 ^v	4,50 ^o	7,20 ^m	4,10 ^q	7,00 ^x	7,10 ^w	8,50 ^b				6,23
Mortero 1:3	1,09 ^z	1,55 ^b									1,32
Mortero 1:4	0,92 ^z	1,34 ^b									1,13
Hormigón 1:2.5:4 17.5 MPa (2500 psi)	1,00 ^v	0,50 ^e									0,75
Hormigón 1:2:3 21MPa (3100 psi)	0,75 ^c	0,95 ^b	1,37 ^z								1,02
Pintura	90,40 ^v	144,00 ^m	81,50 ^y	70,00 ^y							96,48
PVC	70,00 ^v	74,52 ^o	106,00 ^y	67,50 ^b	77,20 ^c						79,04
Porcelana	21,96 ^e	29,00 ^q									25,48

^a Woolley et al., (2005); ^b G. P. Hammond & Jones, (2008); ^c Geoffrey Hammond et al., (2011); ^d Nadoushani & Akbarnezhad, (2015); ^e Vale & Vale, (1991); ^f Cabeza et al., (2021); ^g Dias & Pooliyadda, (2004); ^h Venkatarama Reddy & Jagadish, (2003); ⁱ Kibert, (2013); ^j Freire Guerrero & Marrero, (2015); ^k Méndez & Burgos, (2008); ^l Cherian et al., (2020); ^m Shukla et al., (2009); ⁿ Dissanayake et al., (2017); ^o Vázquez, (2001); ^p ECOINGENIERÍAS et al., (2012); ^q G. Hammond & Jones, (2006); ^r Rivero-Camacho, (2020); ^s Diaz-Rubio, (2011); ^t Wan Omar et al., (2014); ^u De Carvalho Filho, (2001); ^v Chen et al., (2001); ^w Kim et al., (2016); ^x Sharma & Marwaha, (2017); ^y Scheuer et al., (2003).

Huella ecológica (HE)

Según Wackernagel & Rees (1996), la huella ecológica representa la cantidad de tierra necesaria para proporcionar recursos y absorber emisiones de CO₂ de la sociedad mundial, reflejando las repercusiones de la urbanización en el territorio a diferentes escalas (Gonzalez-Vallejo, 2017). Para calcularla, se debe considerar la gestión de los residuos sólidos en la obra, incluyendo mano de obra y transporte de residuos hasta el punto de disposición final. Se asume que las distancias a los botaderos no exceden los 10km, por lo que se considera un recorrido máximo de ida y vuelta de 20 km por viaje ($L_x=20\text{km}$).

Tabla 5: Índices de generación de residuos de construcción y demolición en obra a partir del peso total de los materiales

Descripción de los materiales	Gonzalez- Vallejo (2017)	SAGUT 2021.1 (2021)	Marin-Orrego (2019)	Valor medio
Acero	0,0100	0,0300	0,0420	0,0273
Cobre	0,0100	0,0500	0,0400	0,0333
Fibro Cemento	0,0500			0,0500
Áridos	0,0100			0,0100
Cemento	0,0500	0,0500		0,0500
Hierro Galvanizado	0,0100			0,0100
Poliestireno expandido	0,0500			0,0500
Ladrillo Común	0,0600	0,0200	0,1380	0,0727
Madera	0,0500	0,0500		0,0500
Mortero 1:3	0,0500			0,0500
Mortero 1:4	0,0500			0,0500
Hormigón 1:2.5:4 17.5 MPa (2500 psi)	0,0500		0,0400	0,0450
Hormigón 1:2:3 21MPa (3100 psi)	0,0500		0,0400	0,0450
Pintura	0,0000	0,0100		0,0050
PVC	0,0100	0,0002		0,0051
Porcelana	0,0200	0,0100		0,0150

Sistema outinord

La HE de los materiales se determina a partir de la HC utilizando la fórmula de Gonzalez-Vallejo (2017):

$$HE_{MAT} = \sum_i (C_{mi} \times FE_i) \times \left(\frac{1 - A_{OC}}{A_B} \right) \times FE_C$$

Donde; HE_{MAT} es la huella ecológica producida por los materiales (201,6317hag); $(C_{mi} \times FE_i)$ es la huella de carbono producida por los materiales; A_{OC} es la reducción de emisiones debido a la absorción de los océanos 28% según (Borucke et al., 2013); A_B es el factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ha) según (Global Footprint Network, 2014) y FE_C es el factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26hag/ha).

La HE de los RCD se calculó considerando la gestión de mano de obra, sus aportes alimenticios y residuos urbanos $HE_{M.O.-GRCD}$, además del transporte de los residuos hasta el lugar de disposición final.

Para calcular la HE producida por la alimentación, se consideró el trabajo de Daniela González Moya (2019), que analiza una dieta 100% omnívora para una población de 32'912.293 habitantes, utilizando el escenario optimista de producción. HE_{ALIM} es 2,402E-05hag.

Según Freire (2017) la HE_{RSU} se calcula:

$$HE_{RSU} = ((H_{TRAB} \times R_{RSU} \times E_{RSU} \times 0,72)/A_F) \times FE_B$$

Donde; HE_{RSU} es la huella producida por los residuos urbanos (5,461E-3hag); H_{TRAB} es la cantidad total de horas de trabajo (1.766,40h); R_{RSU} es la cantidad de residuos producidos por hora de trabajo (4,897E-05ton/h*persona); E_{RSU} es el factor de emisión por residuo (0,24tCO₂/tRSU); 0,72 es la reducción de emisiones a absorber debido a la absorción por los océanos (28%) (Borucke et al., 2013); A_F es la productividad del área de absorción de carbono (3,59tCO₂/h) y FE_B es el factor de equivalencia de los bosques (1,29hag/ha).

A partir de estos resultados, sumando HE_{ALIM} y HE_{RSU} , se obtuvo: $HE_{M.O.-GRCD}$ de 5,485E-3hag.

Para el cálculo de la huella generada por el transporte de los RCD, se consideró que los botaderos se encontraron a menos de 10km por ende los recorridos de ida y regreso de volquetas no son mayores a 20km por viaje, considerando el límite superior $L_x=20$ km y se utilizó la fórmula:

$$kg\ CO_2\ eq = \sum DT_j \cdot QM_j \cdot FET_i$$

A partir de los datos de las emisiones generadas por el transporte, se utilizó la fórmula:

$$HE_{TRANSP} = \sum_i (DT_j \times QM_j \times FET_i) \times \left(\frac{1 - A_{OC}}{A_B} \right) \times FE_C$$

La $HE_{TRANSP-RCD}$ es 0,1057hag, en la que $(DT_j \times QM_j \times FET_i)$ son las emisiones del transporte (0,418t*CO₂eq); A_{OC} es la reducción de emisiones debido a la absorción de los océanos 28% según

(Borucke et al., 2013); A_B es el factor de absorción de los bosques (3,59tCO₂/ha) según (Global Footprint Network, 2014) y FE_C es el factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26hag/ha).

De la sumatoria, se estimó que la HE_{GRCD} es $HE_{M.OGRCD} + HE_{TRANSP-RCD}$: 0,1112hag. Es decir que, la HE_{GRCD} de 2UVIS es igual a 3,0894E-3 hag.

HE_{ALIM} es 7,0526E-4hag. La producción de RS fue de 4,8978E-05ton/h*persona. Luego la HE_{RSU} es 5,462E-3hag. Luego la $HE_{M.O}$ es de 0,1610hag. la $HE_{M.O}$ para 2UVIS es 4,4773E-3hag.

Se calculó la huella ecológica de la maquinaria considerando la huella de los equipos a combustible, utilizando el tiempo de uso en el proyecto y la fórmula de Freire (2017):

$$HE_{COMB} = ((V \times E_{COMB} \times 0,72)/A_F) \times FE_B$$

Donde; HE_{COMB} es la huella ecológica de la maquinaria a combustible; V es el consumo de combustible en litros que está dado por $V = (Pot \times TU \times Rend)$ en la que Pot es la potencia del motor de la maquinaria (kW); TU es el tiempo de uso de la maquinaria en los trabajos de obra (h) y $Rend$ es el combustible consumido por el motor (l/kW).

También se tuvo en cuenta la huella producida por la maquinaria / equipo eléctrico utilizado en la obra, y fue calculado con aplicación de la fórmula de (Freire, 2017):

$$HE_{ELEC} = (((Pot \times TU) \times E_{ELEC} \times 0,72)/A_F) \times FE_B$$

Donde; HE_{ELEC} es la huella ecológica de la maquinaria eléctrica; Pot es la potencia del motor de la maquinaria (kW); TU es el tiempo de uso de la maquinaria en los trabajos de obra (h); E_{ELEC} es el factor de emisión del mix energético (tCO₂/kWh); 0,72 es la reducción de emisiones a absorber, debido a la absorción por los océanos (28%) (Borucke et al., 2013), A_F es la productividad del área de absorción de carbono, o factor de absorción con un valor de 3,59 tCO₂/ha (Freire, 2017), y FE_B es el factor de equivalencia de los bosques.

Sumando HE_{COMB} y HE_{ELEC} ; se obtuvo: Huella Ecológica producida por Maquinaria = 1,6660hag. La huella ecológica de la maquinaria para 2UVIS es igual a 4,6279E-2hag.

A partir de los datos de consumo de energía en obra y con la utilización de la fórmula de (Gonzalez-Vallejo, 2017):

$$HE_{ELEC} = C_{ELEC} \times E_{ELEC} \times \left(\frac{1 - A_{OC}}{A_B}\right) \times FE_B$$

La HE_{ELEC} es de 0,0546hag. De aquí se considera que, la HE_{ELEC} durante el proyecto de 2UVIS es

igual a 1,5169E-3hag.

A partir del dato de cantidad de agua consumida (385,206m³), se aplica la fórmula (Gonzalez-Vallejo, 2017):

$$HE_{AGUA} = C_{AGUA} \times IE_{AGUA} \times E_{ELEC} \times \left(\frac{1 - A_{OC}}{A_B} \right) \times FE_B$$

La HE_{AGUA} es de 8,507E-3hag. La HE_{AGUA} requerida para 2UVIS es igual a 2,363E-4hag.

El cálculo de la superficie consumida es de 0,0346 ha, usando la fórmula $HE_{SUP} = S \times FE_B$.

La HE_{SUP} es de 0,0446 hag. De aquí se estimó que, HE_{SUP} para de 2UVIS es igual a 1,2384E-3hag.

Tabla 6. Resumen de resultados cálculo de HE sistema outinord – sistema convencional

Descripción	Proyecto Outinord			Proyecto Convencional		
	HC	EE	HE2UVI	HC	EE	HE2UVI
	tonCO ₂ e	MJ	S	tonCO ₂ e	MJ	S
	q		hag	q		hag
Materiales	853,421		5,990	1101,460		7,732
		9.156.731,36			10.874.050,1	
Fabricación	797,903	2	5,601	933,266	7	6,551
Transporte	55,078		0,387	167,929		1,179
RCD	0,439		3,089E-3	0,265		1,992E-3
Mano de obra			4,473E-3			4,066E-3
			1,959E-05			1,781E-05
Alimentos						
RSU	0,619		4,453E-3	0,563		4,048E-3
Equipos	6,439		4,628E-2	6,504		4,674E-2
A combustibles	4,149		2,982E-2	4,149		2,982E-2
Eléctricos	2,290		1,646E-2			
Electricidad	0,211		1,517E-3	0,211		1,517E-3
Agua	0,033		2,363E-4	0,0316		2,277E-4
Superficie			1,238E-3			1,238E-3
Resumen del proyecto			6,044			7,785

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 7 se muestran las cantidades de materiales (en kg) necesarias para el módulo de dos unidades de vivienda. Se destaca que el sistema convencional de muros de ladrillo pesa ligeramente más que el sistema industrializado outinord, con una diferencia relativa del 2,5.

Tabla 7. Contribución de los materiales de construcción en masa por módulo de dos viviendas

Unidad básica de presupuesto	Sistema Outinord		Sistema con muros confinados	
	Masa (kg)	Porcentaje	Masa (kg)	Porcentaje
Losa de contrapiso por módulo	68329	46,8%	68329	45,7%
Sistema de muros de carga en el sistema				
Outinord	53743	36,8%	0	0,0%
Sistema de muros de ladrillo de arcilla confinados	0	0,0%	57449	38,4%
Viga de cimentación	18398	12,6%	18398	12,3%
Instalaciones sanitarias	2430	1,7%	2430	1,6%
Cubierta en asbesto cemento	1834	1,3%	1834	1,2%
Carpintería	988	0,7%	988	0,7%
Instalaciones hidráulicas	129	0,1%	129	0,1%
Instalaciones eléctricas	55	0,0%	55	0,0%
Total	145906	100%	149612	100%

Huella de carbono (HC)

La HC del sistema outinord emitió 23,7tonCO₂eq/módulo, un 22% menos que el convencional (30,6tonCO₂eq). En outinord, los muros de concreto reforzado emitieron 10,83tonCO₂eq, mientras que, los muros de mampostería confinada 17,7tonCO₂eq. (Ver Figuras 3 y 4 para la contribución de cada unidad básica del presupuesto en la generación de gases de efecto invernadero).



Figura 3. Contribución UBE a la HC sistema outinord

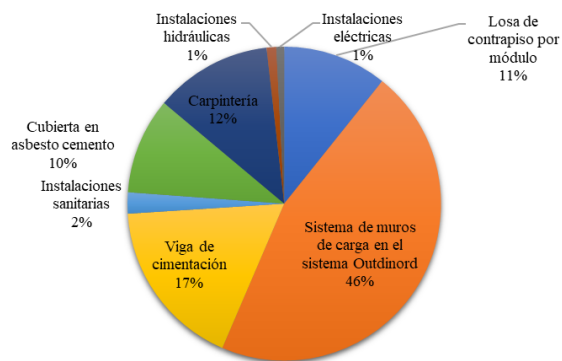


Figura 4. Contribución UBE a la HC sistema convencional.



El proyecto en sistema de mampostería confinada o convencional genera una huella de carbono de 319,1kgCO₂eq/m² de vivienda construida. Mientras que para outinord genera por área construida 247,3kg*CO₂eq/m², un 38% menos que el convencional.

Energía embebida (EE)

Figura 5. Contribución UBE a la EE sistema outinord

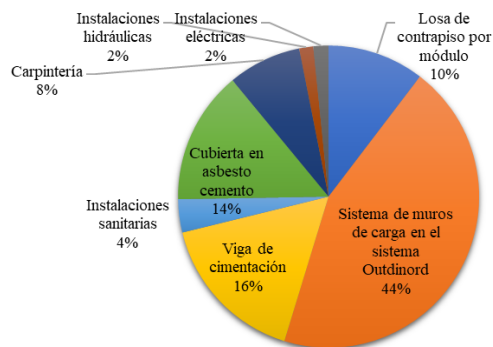
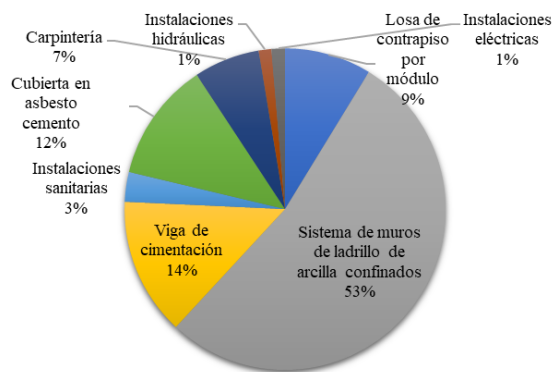
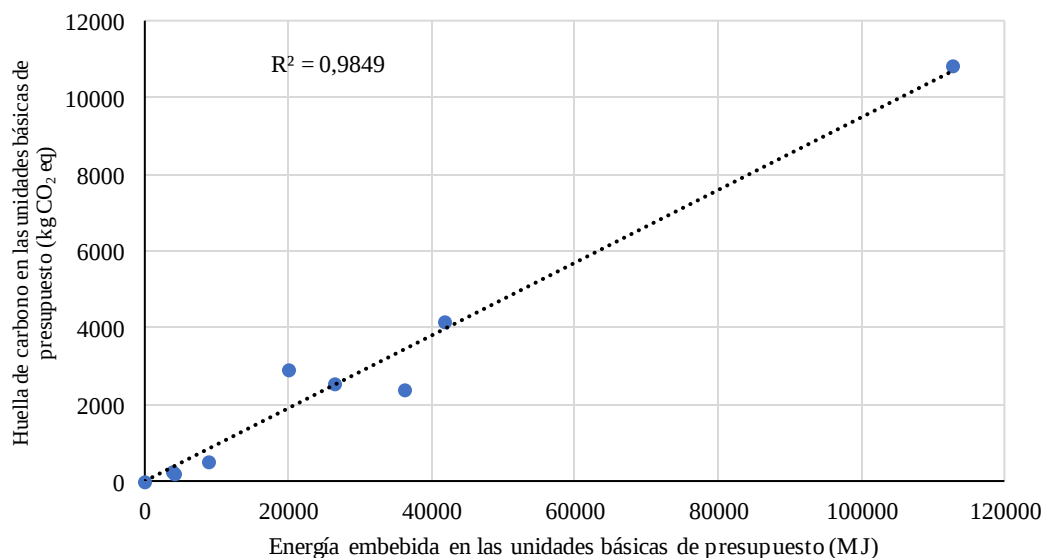


Figura 6. Contribución UBE a la EE sistema convencional



La EE para el sistema outinord, fue de 254,354MJ, mientras que para el de mampostería confinada fue de 302,057MJ, lo que representa un 21,3% menos de energía embebida para el sistema industrializado. La Figura 5 ilustra cómo los muros aportan el 44% de la energía embebida en el sistema outinord. En mampostería confinada, los muros representan el 53% de la EE (ver Figura 6). Se infiere que el proyecto en sistema convencional tiene 3,156.9MJ/m² de EE, mientras que el sistema outinord tiene 2,656.2MJ/m². Se analizó si las UBE tenían alguna relación entre la HC y la EE, dado la similitud en las tendencias de los resultados, lo que se ilustra en la Figura 7, indicando que cualquier estrategia para reducir la energía embebida en un proyecto de construcción también contribuirá significativamente a reducir su huella de carbono.

Figura 7. Relación entre la huella de carbono y la energía embebida para el sistema outinord



Huella ecológica (HE)

Figura 8. Contribución UBE a la HE sistema outinord

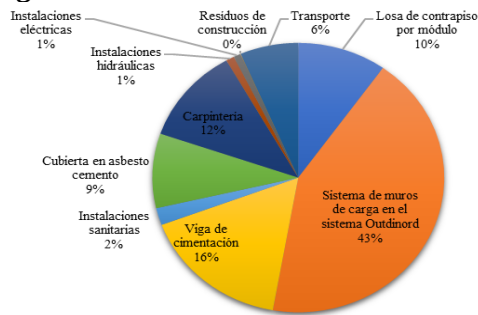
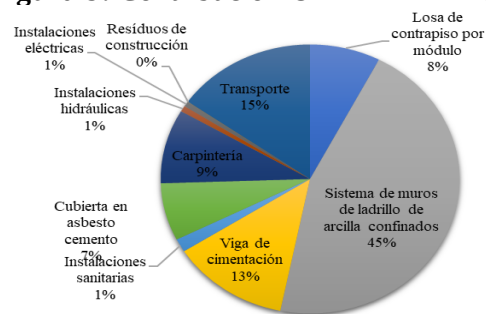


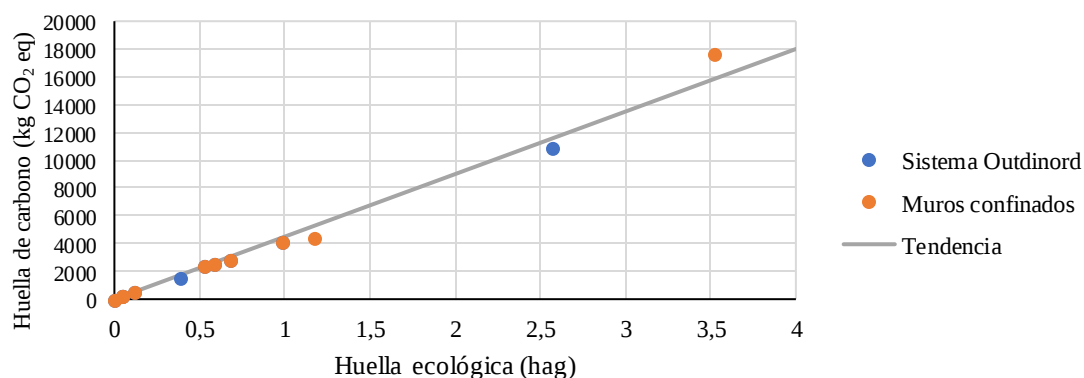
Figura 9. Contribución UBE A LA HE sistema convencional



Para el sistema outinord, la HE se estimó en 5,991 hectáreas globales (hag), mientras que para el sistema con mampostería confinada fue de 7,773 hag, mostrando una diferencia del 22%. Las Figuras 8 y 9 muestran la contribución de cada unidad básica de presupuesto en la HE, donde los muros reforzados son la mayor contribución en ambos sistemas.

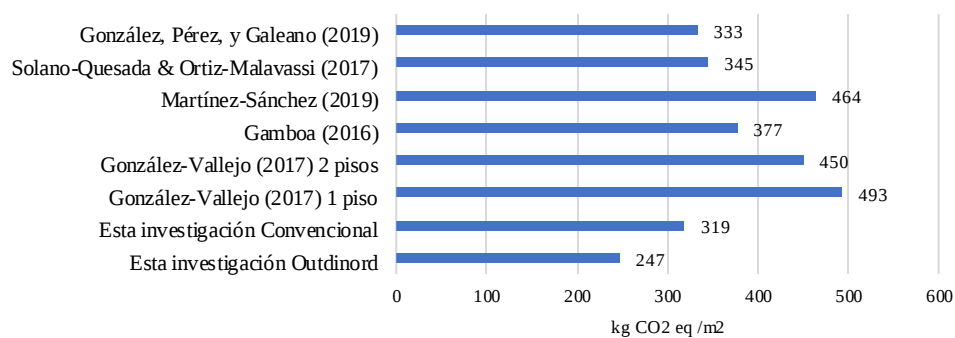
Se observó una relación lineal entre la HC y la HE, con un coeficiente de correlación lineal de 0.9998 (Figura 10), lo que sugiere que la HE puede estimarse rápidamente a partir de la HC para este tipo de proyectos.

Figura 10. Relación entre la HE y la HC



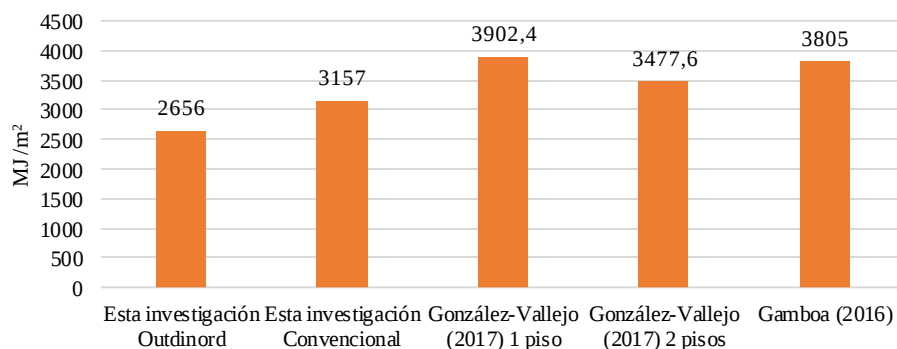
La Figura 11, compara los resultados de la huella de carbono con la literatura. Los valores obtenidos son menores que los reportados en general, pero coherentes con casos colombianos. El sistema convencional solo difiere en $24\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ de un estudio anterior. Los valores promedio en España superan o duplican los obtenidos en este estudio.

Figura 11. Comparación de HC por área construida con algunos trabajos de la literatura



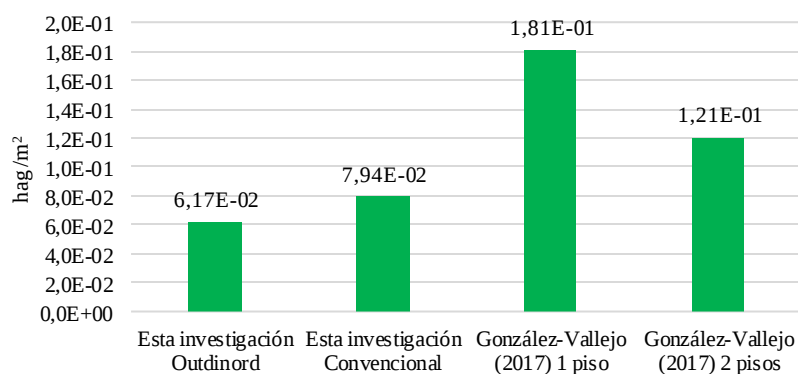
La EE, presenta valores más bajos que los promedios encontrados en la literatura (ver Figura 12).

Figura 12. Comparación de EE por área construida con algunos trabajos de la literatura



Con relación a la HE, la relación es del orden del doble o casi el triple en referencia a las viviendas de uno y dos pisos en España (ver Figura 13).

Figura 12. Comparación HE por área construida con algunos trabajos de la literatura



CONCLUSIONES

Este trabajo se compararon indicadores de impacto ambiental de dos sistemas constructivos: uno industrializado y otro tradicional, fueron explorados tres indicadores, energía embebida, huella de carbono y huella ecológica (EE, HC, HE), encontrando que en el caso de estudio de viviendas de interés social en San Andrés de Tumaco en la costa pacífica colombiana el sistema industrializado tiene un menor impacto ambiental en comparación con la mampostería confinada, lo que muestra que el sistema industrializado es más sostenible. Fueron evaluadas las relaciones entre los tres indicadores para el estudio de caso encontrando una relación correlación lineal positiva, lo que permita elegir cualquiera de ellos y tener una idea de los otros dos según la necesidad, esto abre una línea de trabajo en investigación donde se requieren más estudios para una evaluación completa de los impactos ambientales y su inclusión como criterio de selección entre alternativas constructivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V., & Godes, B. (2011). Análisis del ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción: El caso de las baldosas cerámicas. *Informes de la Construcción*, 63(522), 71-81. <https://doi.org/10.3989/ic.10.034>
- Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Iha, K., Larson, J., Lazarus, E., Morales, J. C., Wackernagel, M., & Galli, A. (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, 24, 518–533. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.005>
- Cabeza, L. F., Boquera, L., Chàfer, M., & Vérez, D. (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, 231, 110612. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>
- Cadavid M, G. (2014). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso siderúrgico*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51270>
- Cang, Y., Yang, L., Luo, Z., & Zhang, N. (2020). Prediction of embodied carbon emissions from residential buildings with different structural forms. *Sustainable Cities and Society*, 54(December), 101946. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101946>
- CAR, CAEM, & Bogotá, C. de C. de. (2013). Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono



- corporativa a nivel sectorial. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade1b0319769.pdf>
- Carrasco L, J. (2015). Mecanismo para la mitigación voluntaria de emisiones de gases efecto invernadero para Colombia.
- Chen, T. Y., Burnett, J., & Chau, C. K. (2001). Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*, 26(4), 323–340. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00006-8)
- Cherian, P., Palaniappan, S., Menon, D., & Anumolu, M. P. (2020). Comparative study of embodied energy of affordable houses made using GFRG and conventional building technologies in India. *Energy and Buildings*, 223, 110138. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110138>
- Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. ., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- Daniela González Moya, J. (2019). *Cálculo de la huella ecológica en Colombia a partir de la comparación del plan nutricional omnívoro vs. el vegetariano*. 1–21. Universidad Santiago de Cali.
- De Carvalho Filho, A. C. (2001). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2117/93218>
- Dias, W. P. S., & Pooliyadda, S. P. (2004). Quality based energy contents and carbon coefficients for building materials: A systems approach. *Energy*, 29(4), 561–580. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2003.10.001>
- Diaz-Rubio, R. (2011). *Repercusión medioambiental del uso de la cerámica estructural en España*. *Energía Embebida y Emisiones de CO₂* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://zaguán.unizar.es/record/10321/files/TAZ-TFM-2013-144.pdf>
- Dissanayake, D. M. K. W., Jayasinghe, C., & Jayasinghe, M. T. R. (2017). A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*, 135, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>
- ECOINGENIERÍAS, S., UPME, & PNUD. (2012). *Determinación de propiedades físicas y estimación*

del consumo energético en la producción de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones.

https://silo.tips/queue/informe-final-contrato-no-ecoingenieria?&queue_id=-1&v=1713680847&u=MTgxLjIyNC4xNjEuMTUy

Encord. (2012). *ENCORD Construction CO₂e Measurement Protocol A Guide to reporting against the Green House Gas Protocol for construction companies*. 1–36.

https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/ENCORD-Construction-CO2-Measurement-Protocol-Lo-Res_FINAL_0.pdf

Fernanda, R., Nelson, S., & Souza, M. De. (2021). Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. *Ambiente Construido*, 21(1), 37–50.

<https://doi.org/dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100492>

Freire-Guerrero, A., Alba-Rodríguez, M. D., & Marrero, M. (2019). A budget for the ecological footprint of buildings is possible: A case study using the dwelling construction cost database of Andalusia. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101737.

<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101737>

Freire, A. (2017). *Presupuesto ambiental. evaluación de la huella ecológica del proyecto a través de la clasificación de la base de costes de la construcción de Andalucía*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. <https://hdl.handle.net/11441/76163>

Freire, A., Marrero, M., & Muñoz, J. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Revista Hábitat Sustentable*, 6(1), 6–17.

<https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2316>

Freire Guerrero, A., & Marrero, M. (2015). Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación. *Hs*, 5(1), 54–63.

<https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1812>

Gieseckam, J., Barrett, J., Taylor, P., & Owen, A. (2014). The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. In *Elsevier*.



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814003570>

Gómez, A. M. (2019). Estrategias para reducir el impacto ambiental en pequeños generadores de residuos de construcción y demolición [Pontificia Universidad Javeriana Cali].

<http://hdl.handle.net/11522/12247>

Gonzalez-Vallejo, P. (2017). Evaluación Económica y Ambiental de la Construcción de Edificios Residenciales. Aplicación a España y Chile. Universidad de Sevilla.

<http://hdl.handle.net/11441/64005>

González, P. (2018). Herramienta para la estimación de costes económicos y ambientales en el ciclo de vida de edificios residenciales. Fase de construcción. *Revista Hábitat Sustentable*, 8(2), 32–51.

<https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.03>

González, P., Solís, J., Llácer, R., & Marrero, M. (2015). La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica. *Informes de la construcción*, 67(539), 1–13. <https://doi.org/10.3989/ic.14.017>

Hammond, G., & Jones, C. (2006). Inventory of Carbon & Energy (ICE). In *Mechanical Engineering*.

https://www.appropedia.org/w/images/5/56/ICE_Version_1.6a.pdf

Hammond, G. P., & Jones, C. (2008). Inventory Of Carbon & Energy (ICE) Version 1.6a.

www.bath.ac.uk/mech-eng/ser/embodied/

Hammond, Geoffrey, Jones, C., Lowrie, E. F., & Tse, P. (2011). *A BSRIA guide Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy*.

<https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>

Ihobe, S. A. (2009). Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. <https://www.ihobe.eus/publicaciones/analisis-ciclo-vida-y-huella-carbono-dos-maneras-medir-impacto-ambiental-un-producto-2>

<https://www.ihobe.eus/publicaciones/analisis-ciclo-vida-y-huella-carbono-dos-maneras-medir-impacto-ambiental-un-producto-2>

Khan, J. S., Zakaria, R., Aminuddin, E., Abidin, N. I., Sahamir, S. R., Ahmad, R., & Abas, D. N. (2018). Web-based automation of green building rating index and life cycle cost analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012062>

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012062>



- Kibert, C. (2013). Sustainable Construction Green Building Design and Delivery. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- <https://thuvienso.hoasen.edu.vn/bitstream/handle/123456789/9374/Contents.pdf?sequence=5>
- Kim, H., Shen, Z., Kim, I., Kim, K., Stumpf, A., & Yu, J. (2016). BIM IFC information mapping to building energy analysis (BEA) model with manually extended material information. *Automation in Construction*, 68, 183–193. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2016.04.002>
- Marin-Orrego, J. (2019). Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto institucional: estudio de caso. Pontificia Universidad Javeriana Cali. <https://vitela.javerianacali.edu.co/handle/123456789/721>
- Marrero, M., Martínez-Escobar, L., Mercader, M. P., & Leiva, C. (2013). Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados. *Informes de la construcción*, 65(529), 89–97. <https://doi.org/10.3989/ic.11.034>
- Marrero, Madelyn, Puerto, M., Rivero-Camacho, C., Freire-Guerrero, A., & Solís-Guzmán, J. (2017). Assessing the economic impact and ecological footprint of construction and demolition waste during the urbanization of rural land. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.020>
- Méndez, T. D. R., & Burgos, A. (2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10. *Informes de la construcción*, 60(509), 25–34. <https://doi.org/10.3989/ic.2008.v60.i509.588>
- Mercader, M. P., Marrero, M., Solís, J., Montes, M. V., & Ramírez, A. (2010). Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. *Informes de la construcción*, 62(517), 125–132. <https://doi.org/10.3989/ic.09.000>
- Muñoz, C., & Quiroz, F. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 4(2), 16–25. <https://core.ac.uk/download/pdf/230577295.pdf>
- Nadoushani, Z., & Akbarnezhad, A. (2015). Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings. *Energy and Buildings*, 102, 337–346.



<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.044>

Núñez B, C. (2019). Cálculo de la huella de carbono de las estructuras tipo de la zona céntrica de la ciudad de Ambato. Universidad Técnica de Ambato.

<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30021>

ONU. (2015). Transformar el mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Asamblea General*, 1–40. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf

Rivero-Camacho, C. (2020). Estudio de huellas en el ciclo de vida del edificio residencial. Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/102354>

Ros García, J. M., & Sanglier Contreras, G. (2017). Análisis del Ciclo de Vida de una Unidad Prototipo de Vivienda de Emergencia. La búsqueda del impacto nulo. *Informes de la construcción*, 69(547). <https://doi.org/10.3989/ic.16.035>

Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35(10), 1049–1064. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00066-5)

Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2013). Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. *Building and Environment*, 67, 211–216.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.022>

Sharma, A., & Marwaha, B. M. (2017). Una metodología para la clasificación del desempeño energético del parque de viviendas de Hamirpur. *HBRC Journal*, 13(3), 337–352.

<https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.11.003>

Shukla, A., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2009). Análisis de la energía incorporada en una casa de adobe. *Energía Renovable*, 34(3), 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>

Sinha, R., Lennartsson, M., & Frostell, B. (2016). Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study. *Building and Environment*, 104, 162–171.

<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.buildenv.2012>

Solís-Guzmán, J. (2010). Evaluación de la huella ecológica del sector edificación (uso residencial) en la Comunidad Andaluza. (Tesis Doctoral Inédita). Universidad de Sevilla, Sevilla.

<http://hdl.handle.net/11441/23950>



- Solís-Guzmán, J., Marrero, M., & Ramírez-De-Arellano, A. (2013). Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain). *Ecological Indicators*, 25(1), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.008>
- Solís-Guzmán, J., Martínez-Rocamora, A., Marrero, M. (2014). Methodology for Determining the Carbon Footprint of the Construction of Residential Buildings. In: Muthu, S. (eds) *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, Volume 1. EcoProduction. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-41-2_3
- Vasquez-Palacios, J. R., & Quesada-Molina, J. F. (2017). Determinación del costo de construcción de las diferentes clasificaciones para una vivienda sustentable en la Ciudad de Cuenca, Ecuador. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(2), 28–39. <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.03>
- Vázquez Espí, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29-43.
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_tc/article/view/2826
- Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings*, 35(2), 129–137.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4)
- Wan Omar, W. M. S., Doh, J. H., & Panuwatwanich, K. (2014). Variations in embodied energy and carbon emission intensities of construction materials. *Environmental Impact Assessment Review*, 49(31–48). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.06.003>
- Woolley, T., Kimmins, S., Harrison, P., & Harrison, R. (2005). *Green Building Handbook: Volume 1: A Guide to Building Products and Their Impact on the Environment* (1st ed.). Routledge.
- Wszolek, T., Kłaczyński, M., Mleczko, D., & Ozga, A. (2014). On certain problems concerning environmental impact assessment of wind turbines in scope of acoustic effects. *Acta Physica Polonica A*, 125(4A), 38–44. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.A-38>

