



**DESEMPEÑO AMBIENTAL DEL P02:
PROTOTIPO DE SISTEMA HABITABLE MODULAR EN ELEMENTOS
CONSTRUCTIVOS NO ESTRUCTURALES**

Estudiante
Valentina Celis Montoya

Trabajo de grado presentado para optar al título de Arquitecto

Asesores

Luis Felipe Lalinde Castrillón
PhD en Ingeniería de la construcción

Verónica Henriques Ardila
Magister en Bioclimática

Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Arquitectura y Diseño
Arquitectura

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

A todas las personas y experiencias que me hicieron enamorar del medio ambiente.

Agradecimientos

Quiero agradecerle a mi asesor Luis Felipe Lalinde por el acompañamiento y por abrirme las puertas a un nuevo mundo de conocimiento.

Tabla de contenido

Resumen.....	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Justificación.....	15
3. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos	18
4. Marco teórico	19
4.1 Mapa conceptual.....	19
5. Marco contextual.....	26
7. Desarrollo	32
7.1 Alcance:.....	32
7.1.1 Unidad funcional:.....	32
7.1.2 Etapas del ciclo de vida que se tendrán en cuenta en el análisis.....	33
7.1.3 Materiales a analizar.....	34
7.1.4 Huellas a evaluar.....	35
7.2 Aproximación al diseño del habitáculo	35
7.2.1 Dimensiones	35
7.2.2 Cimentación:	38
7.2.3 Estructura:	38
7.2.4 Envolverte:.....	40
7.3 Realización del análisis.....	41
7.3.1 Diagramas de flujo de los materiales.....	41

8. Resultados	44
8.1 Evaluación de resultados.....	44
8.2 Comparación de resultados	48
.....	50
9. Estrategias de mejora desde el ecodiseño	52
10. Mecanismos de compensación de CO2	54
10.1 Compensación voluntaria de carbono.....	54
10.2 Certificaciones ambientales	55
10.3 Bonos de carbono.....	56
10.4 Programas de reforestación y conservación	57
11. CONCLUSIONES	59
Referencias.....	62

Lista de tablas

<i>Tabla 1: Metodología.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Cantidades Columnas. Realizada por el autor.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Cantidades vigas. Realizada por el autor</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4. Cantidades envolvente. Realizada por el autor</i>	<i>40</i>

Lista de figuras

Figura 1: Mapa conceptual. Creado por el autor.....	19
Figura 2: Esquema ACV. Creado por el autor.....	20
Figura 3:Esquema del ciclo ecológico. Creado por el autor.....	23
Figura 4: Isométrico explotado y acotado habitáculo. Creado por el autor.....	32
Figura 5: Esquema Cradle to grave. Creado por el autor.....	33
Figura 6: Fichas técnicas materiales. Creado por el autor.....	34
Figura 7: Propuesta 1. Creado por el autor.....	35
Figura 8: Propuesta 2 - Habitáculo de 3.05 x 2.40 m.....	36
Figura 9: Propuesta 3 - Habitáculo de 3.00 x 2.50 m.....	36
Figura 10: Esquema planimétrico habitáculo. Creado por el autor.....	37
Figura 11: Diagrama de Flujo placa GRC. Creado por el autor.....	41
Figura 12: Diagrama de flujo Placa Superboard. Creado por el autor.....	42
Figura 13: Diagrama de flujo ladrillo convencional. Creado por el autor.....	43
Figura 14 Diagrama de flujo Ladrillo estructural. Creado por el autor.....	44
Figura 15 Resultados ACV Panel GRC. Gráficos de One click LCA.....	45
Figura 16 Resultados ACV placa de Superboard. Gráficos de One Click LCA.....	46
Figura 17 Resultados ACV ladrillo convencional. Gráficos de One Click LCA.....	47
Figura 18 Carbono embebido. Gráficos de One Click LCA.....	48
Figura 19. Comparación de Kg de CO ₂ eq. Gráficos de One click LCA.....	49
Figura 20 Kg de CO ₂ equivalente según recurso. Gráficos de One click LCA.....	50
Figura 21 Índice potencial calentamiento global por material. Gráfico de One Click LCA.....	51

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

Banrep: Banco de la República

C2C: Cradle to Cradle

C2G: Cradle to Gate

CH4: Metano

CO2: Dióxido de Carbono

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

ECV: Encuesta Nacional de Calidad de Vida

EIA: Universidad EIA

EPD: Declaración Ambiental de Producto

GEI: Gases de Efecto Invernadero

ISO: International Organization for Standardization

LCA: Life Cycle Assessment

LEED: Leadership in Energy and Environmental Design

N2O: Óxido Nitroso

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PIB: Producto Interno Bruto

TonCo2eq: Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente

UPB: Universidad Pontificia Bolivariana

Resumen

El creciente interés por la sostenibilidad y el medio ambiente ha llevado a una preocupación global por los efectos negativos del desarrollo industrial en los ecosistemas. El sector de la construcción, responsable del 30-40% del consumo de energía mundial, ocupa un lugar crucial en esta problemática. Esta monografía académica aborda el tema de la sostenibilidad en el sector de la construcción, con un enfoque particular en la evaluación del desempeño ambiental de un prototipo modular mediante el análisis de huellas con enfoque de ciclo de vida, utilizando herramientas como One Click LCA. La metodología propuesta implica enfocarse en los materiales de la envolvente, comparando un material eficiente energéticamente con su equivalente comercial, calculando sus huellas de carbono, hídrica y energética, para luego evaluar el impacto de las variaciones en la envolvente en estas huellas y proponer estrategias de reducción desde el ecodiseño.

Palabras clave: Huellas ambientales, eficiencia energética, ecodiseño, análisis de ciclo de vida

Abstract

The growing interest in sustainability and the environment has led to global concern about the negative effects of industrial development on ecosystems. The construction sector, responsible for 30-40% of global energy consumption, occupies a crucial place in this problem. This academic monograph addresses the topic of sustainability in the construction sector, with a particular focus on the evaluation of the environmental performance of a modular prototype through footprint analysis with a life cycle approach, using tools such as One Click LCA. The proposed methodology involves focusing on the envelope materials, comparing an energy efficient material with its commercial equivalent, calculating its carbon, water and energy footprints, and then evaluating the impact of variations in the envelope on these footprints and proposing strategies. reduction from eco-design.

Keywords: Environmental footprints, energy efficiency, ecodesign, life cycle analysis

Introducción

La creciente preocupación por el medio ambiente y la necesidad de un futuro sostenible se han convertido en temas centrales en la agenda global durante las últimas décadas. El desarrollo industrial ha provocado una serie de desequilibrios en los sistemas ecológicos del planeta, generando problemas como el deterioro de la capa de ozono, el agotamiento de recursos naturales, la acumulación de residuos y el calentamiento global, cuyas consecuencias podrían amenazar la vida en la tierra tal como la conocemos (Ambiente Bogotá, 2011).

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ y promover la sostenibilidad en el sector de la construcción se vuelve imperativa en la lucha contra el cambio climático. La transformación hacia prácticas más conscientes y eficientes energéticamente se vuelve esencial para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para 2050 (Oxfam, 2020). Sin embargo, se requiere un enfoque integral que abarque desde la etapa de diseño hasta la ejecución de proyectos, es aquí donde metodologías como el ACV se vuelven fundamentales en el desarrollo consciente y eficiente de proyectos del sector.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en evaluar el desempeño ambiental de un prototipo modular, utilizando herramientas de análisis de ciclo de vida para calcular sus huellas de carbono, hídrica y energética. A través de este análisis, se busca identificar las principales áreas de mejora y proponer estrategias de ecodiseño que conduzcan a una edificación más sostenible y, en última instancia, carbono neutral.

Este estudio no solo aspira a generar conocimiento y propuestas concretas para mejorar la sostenibilidad en la construcción, sino que también busca inspirar a otros estudiantes y profesionales a adoptar prácticas más responsables y conscientes en sus proyectos. Además, pretende destacar la importancia de la colaboración interdisciplinaria entre la arquitectura y la ingeniería como un camino hacia la innovación y el desarrollo sostenible

1. Planteamiento del problema

Durante las últimas décadas, la creciente preocupación por el medio ambiente y un futuro sostenible ha ganado cada vez más importancia. El ritmo de vida que lleva la humanidad desde el periodo de desarrollo industrial ha causado una serie de transformaciones en el balance natural de los sistemas ecológicos del planeta, creando, a su vez, una nueva serie de problemas en el mundo contemporáneo, como el desgaste de la capa de ozono, el consumo desmedido de recursos naturales, la excesiva generación y acumulación de residuos, el calentamiento global, entre otros. Problemas que, de no ser tratados con la seriedad necesaria, pueden acabar con la vida en la tierra tal cual la conocemos. (Ambiente Bogotá, 2011)

Es por esto que el desarrollo sostenible se ha convertido en un tema de conversación fundamental en diferentes esferas de la sociedad. La ONU define este concepto como “la satisfacción de «las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (ONU, 1987). En el año 2015 la ONU adopta los objetivos del desarrollo sostenible o ODS, como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta, y garantizar que en el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad. (ONU, 2015).

Desde este momento, todos los estados miembros de las naciones unidas se comprometen a generar el cambio que el planeta necesita para otorgarle paz y prosperidad a todos sus habitantes. En este sentido, tanto sectores públicos como privados deben proceder de forma colaborativa priorizando el bien común, es por esto que los sectores industriales, entonces, se convierten en actores con gran influencia en la evolución de este proyecto, al ser estos últimos los grandes responsables de la situación actual del planeta.

El sector de la construcción particularmente ocupa una posición determinante. A nivel mundial, entre el 30 y 40% de la energía producida se utiliza en edificios. (Ambiente Bogotá, 2011). Esto tiene un gran impacto ambiental tanto a nivel local como global, teniendo en cuenta que casi toda esta energía proviene de fuentes no renovables. La

preocupación por el medio ambiente y un futuro sostenible hace que este tema tome gran importancia, entendiendo que, por medio de las acciones correctas, se puede lograr disminuir, detener, o incluso revertir el deterioro ambiental procedente de los modelos de desarrollo humano que se practican en la actualidad.

Conseguir que el impacto energético de una edificación se reduzca a lo largo su ciclo de vida es algo que todos los profesionales del sector deben procurar. Por esto, partiendo del caso de estudio de un prototipo modular y su interpretación como un habitáculo con varias propuestas de uso, el análisis de su ciclo de vida y huellas de carbono, hídrica y energética, se espera poder, primero, realizar una evaluación ambiental significada del proyecto, y segundo, a partir de los resultados, proponer soluciones arquitectónicas basadas en estrategias de ecodiseño que puedan mejorar este desempeño, orientando la reflexión a la posibilidad de establecer mejoras hacia el concepto de carbono neutral.

Para esto, esta monografía plantea una serie de preguntas que orientaran el proceso investigativo. Proponiendo como pregunta principal, ¿Cuál es la huella de carbono del habitáculo? que serán obtenidas por medio de la realización del análisis del ciclo de vida de la edificación, complementándose con el estudio de modificaciones en la envolvente de la misma y explorando, por último, como desde el ecodiseño se podría mejorar el desempeño ambiental de la edificación.

2. Justificación

La industria de la construcción está indudablemente asociada al desarrollo de los países, el avance en su infraestructura, la generación de empleo, y, en general el mejoramiento en la calidad de vida dentro de una sociedad. Según estadísticas del Banco de la república, en el 2021, el sector de la construcción representó un 4,72% del PIB de Colombia, ubicándose entre los 10 más relevantes en la economía del país (Banrep, 2021). A pesar de esto, también en Colombia, la industria de la construcción, en promedio, consume el 40% de la energía primaria, genera el 30% del CO₂ y el 40% de los residuos, además de consumir el 60% de los materiales extraídos de la tierra (Banrep, 2021). Durante la última ronda de conversaciones en la conferencia sobre el clima, la COP27 de la ONU, se concluye que el sector de la construcción fue responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones de CO₂ asociadas a la energía y sus operaciones (ONU,2022). Durante el 2021, el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono del sector de la construcción han repuntado desde la pandemia hasta alcanzar un máximo histórico, un equivalente de diez gigatoneladas de dióxido de carbono, 5% más alto que los niveles de 2020 y 2% por encima del pico prepandémico de 2019. La demanda de energía para calefacción, refrigeración y equipamiento de los edificios aumento un 4% con respecto a 2020 y un 3% con respecto al 2019. (ONU,2022)

El CO₂ es la sustancia que más contribuye al efecto invernadero, y su aumento en la atmosfera es el desencadenante del cambio climático causado por el calentamiento global. Estas cifras dejan en evidencia que el sector de la construcción, a pesar de ser fundamental para el desarrollo económico de un país, emite cantidades incongruentes e injustificables de este perjudicial gas, y que la transformación del sector hacia la descarbonización no solo es importante sino imprescindible en los esfuerzos de la humanidad para detener el cambio climático. Plantar árboles no es suficiente. Según Oxfam, *“para absorber suficientes emisiones de carbono y lograr el “cero neto” en 2050 requeriría 1.600 millones de hectáreas de nuevos bosques. Eso es cinco veces el tamaño de la India, o más que todas las tierras de cultivo del mundo”* (Oxfam, 2020). Por esto es

importante que, desde las primeras decisiones en la etapa de diseño, se propongan soluciones conscientes, energéticamente eficientes, para invertir el tiempo y los recursos necesarios en la reducción de generación de CO₂ en lugar de la posterior absorción de este.

Afortunadamente, el mundo se está despertando. Una encuesta realizada en 2020 por el Boston Consultancy Group reveló que, de 3.000 participantes de ocho países, el 70% era más consciente ahora que antes del COVID-19 *"de que la actividad humana amenaza el clima y que la degradación del medio ambiente, a su vez, amenaza a los seres humanos"*(BCG, 2020). El aumento del activismo climático entre los jóvenes, que se considera uno de los mayores movimientos mundiales de la historia- demuestra una creciente conciencia de la amenaza que se cierne sobre el futuro. Este fenómeno se traduce en un posible aumento del número de personas inspiradas para hacer más.

El cambio comienza desde adentro, y el primer paso es la concientización. No es necesario ser activista para generar un cambio. Es importante que todas las personas, desde su respectiva área de influencia, modifiquen sus hábitos y acciones para evitar que, a causa de prácticas inconscientes y egoístas, causemos daños irreversibles en el planeta. Por esto esta monografía, Siguiendo el proyecto en desarrollo del prototipo modular para energética 2030, busca realizar una evaluación del desempeño ambiental de la misma por medio del análisis del ciclo de vida de la edificación, y el cálculo de sus principales huellas previamente establecidas, enfocándose en los materiales de su envolvente, para así, no solo demostrar que realizar este tipo de análisis, aunque sean de forma simplificada, permite llegar a conclusiones que benefician y enriquecen el proceso de diseño de una edificación, y que, efectivamente, está dentro de los alcances y capacidades de un estudiante de arquitectura, sino también que construir edificaciones con un buen desempeño ambiental, huellas de carbono bajas, o incluso neutras, en la mayoría de los casos, no debería representar complicaciones mayores si se toman las decisiones correctas desde la etapa de diseño.

Se espera, por último, que la temática tratada en esta monografía entusiasme a otros estudiantes a tomarse el tema de la sostenibilidad y el ecodiseño, como verdaderas y potentes herramientas a la hora de proyectar. También vale la pena resaltar la importancia de la multidisciplinariedad entre diferentes campos de estudio como parte de

un proceso integral de aprendizaje. Esta monografía se plantea como una especie de experimento, en el cual la arquitectura se enriquece por medio de técnicas normalmente cercanas a la ingeniería, y un proyecto de investigación liderado por ingenieros se complementa con herramientas de diseño arquitectónico. Este intercambio de conocimiento entre campos permitirá que el proyecto tenga un alcance mucho mayor, donde los resultados obtenidos podrán ser utilizados e interpretados por personas con diferentes tipos de conocimiento, y, sobre todo, y servirá como referente para futuros proyectos de investigación académicos donde se utilizará la multidisciplinariedad como herramienta de creación de conocimiento.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño ambiental del prototipo modular mediante el análisis de huellas con enfoque de ciclo de vida, a través del uso de la herramienta One click LCA

3.2 Objetivos específicos

- Realizar el análisis de ciclo de vida del prototipo construido con materiales tradicionales y variaciones en la envolvente, calculando la huella de carbono.
- Evaluar el impacto que tiene las variaciones de la envolvente en las huellas ambientales calculadas, comparando los diferentes resultados entre sí.
- Proponer como desde el ecodiseño se pueden generar estrategias para la reducción de las huellas encontradas, apuntando a lograr una edificación carbono neutral.

4. Marco teórico

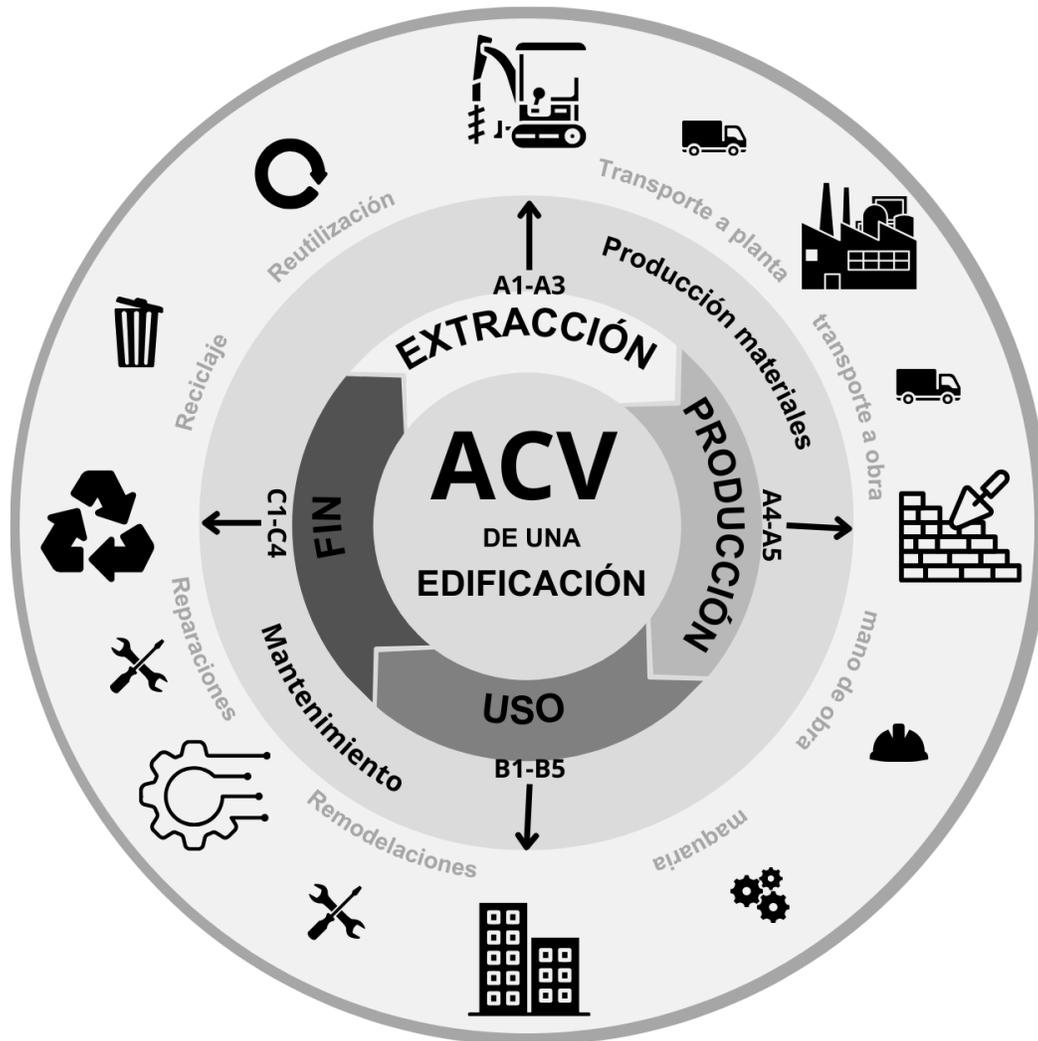
4.1 Mapa conceptual



Figura 1: Mapa conceptual. Creado por el autor

Los edificios, al igual que los seres vivos, las materias primas, y todos los bienes y servicios de consumo que son producidos por el ser humano tienen un ciclo de vida. El concepto de ciclo de vida es fundamental en diversos campos, desde la biología y la ecología hasta la gestión empresarial y la ingeniería (Pinto & Slevin, 1987). En términos generales, se refiere al conjunto de etapas o fases que caracterizan la existencia o evolución de un organismo, producto, proyecto o sistema. A lo largo de estas etapas, se producen una serie de cambios, desarrollos y eventos que impactan en su funcionamiento, rendimiento y, en algunos casos, su sostenibilidad a lo largo del tiempo.

El ciclo de vida de una edificación es un concepto fundamental en la planificación, diseño, construcción y gestión de infraestructuras y construcciones. Se refiere al conjunto de etapas que atraviesa un edificio desde su concepción hasta su demolición. En general, un ciclo de vida se puede subdividir en 4 etapas o fases. La extracción de materias primas, la producción, el uso y mantenimiento y el fin.



PRODUCTO A1-A3	CONSTRUCCIÓN A4-A5	USO B1-B5	FIN C1-C4
A1 Extracción de materia prima	A4 Transporte a obra	B1 Uso	C1 Demolición/ desensamblaje
A2 Transporte a planta	A5 Construcción	B2 Mantenimiento	C2 Transporte
A3 Manufactura		B3 Reparación	C3 Procesamiento de Residuos
		B4 Reemplazo	C4 Desecho
		B5 Remodelación	

Figura 2: Esquema ACV. Creado por el autor.

Para medir la interacción de los edificios con el medio ambiente e identificar las cargas que este produce durante sus diferentes etapas, se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) (ISO 14040:2006, 2006), el cual permite evaluar y comprender los impactos que tiene la existencia de una edificación en diferentes ámbitos y escalas. Este tipo de análisis proporciona una descripción que puede ser tanto general como específica, dependiendo del alcance de este, del desempeño ambiental del objeto de estudio, y así, por medio de datos, contribuye a desmitificar percepciones fijas sobre mecanismos ambientales.

Es cierto que la aplicación de metodologías de ACV sigue siendo complicada, pues el sector de la construcción, sobre todo en países en vía de desarrollo, no cuenta con bases de datos que brinden información exacta (Rivero-Camacho et al., 2023), pero, de cualquier forma, el ACV se ha convertido en una práctica esencial en la gestión sostenible de la construcción y ofrece una serie de beneficios sustanciales, como la cuantificación de emisión de gases de efecto invernadero, la toma de decisiones informadas respaldadas por datos, en cuanto a selección y origen de materiales, sistemas y métodos constructivos, o incluso la planificación de estrategias de eficiencia energética. (Sala et al., 2018). Aspectos que pueden ser muy beneficiosos en el ámbito económico, social y ambiental.

Por medio del ACV de una edificación previo a su construcción, de una edificación existente, o de los materiales y elementos constructivos que la componen, se logran comparar diferentes alternativas de un mismo de diseño, utilizando diferentes materiales, proveedores, estrategias y tecnologías que permiten tomar decisiones inteligentes económica y ambientalmente; convirtiendo al ACV en una herramienta para el diseño sostenible.

Según Salvador Capuz, “La conciencia de que es en la fase de diseño cuando más eficazmente pueden introducirse mejoras medioambientales en los productos y procesos industriales, unido a la política de “quien contamina, paga” que hace recaer la responsabilidad del impacto medioambiental sobre el productor” así, a través de metodologías como el ecodiseño, cuyo principal objetivo es “obtener una mejora general de la ecoeficiencia y calidad del producto, se puede reducir el impacto ambiental sobre

todas las decisiones adoptadas relacionadas con el ciclo de vida del producto: selección de materiales y procesos constructivos, acabados, tratamientos superficiales, etc”.(Ecodiseño: Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles, 2004) Por tanto, el ecodiseño se puede apoyar en el desarrollo de un análisis de ciclo de vida para identificar cuáles son los impactos ambientales de un producto y en qué etapa se producen. Una vez que se determinan estos impactos, se establecen los objetivos de mejora de los mismos y se definen las medidas para su consecución.

En la guía para la selección de materiales de construcción sostenible se explica que “el ecodiseño puede integrarse dentro de la organización como un sistema de gestión de diseño”(Intromac, 2019). Su objetivo va más allá de garantizar el diseño de un determinado producto respetuoso con el medio ambiente, se busca, más bien, componer un sistema que permita identificar, controlar y mejorar de manera continua los aspectos ambientales de un producto para que se pueda adaptar progresivamente a medida que avance la técnica(Intromac, 2019)

Como se menciona anteriormente, un ACV mide el impacto ambiental de una edificación, y este puede ser tan general o detallado como se desee. Esto dependerá de los impactos o huellas que el análisis decida cuantificar, según el objetivo y el alcance de la investigación, y del acceso a datos exactos reales. Es importante determinar que fases del ciclo de vida se tendrán en cuenta en el análisis, ya sea de la cuna a la puerta de la fábrica (incluye etapa de extracción y producción) de la cuna a la tumba (desde la extracción hasta el fin), o de la cuna a la cuna (incluye todo el ciclo completo más la reutilización de los recursos que reinician el ciclo).

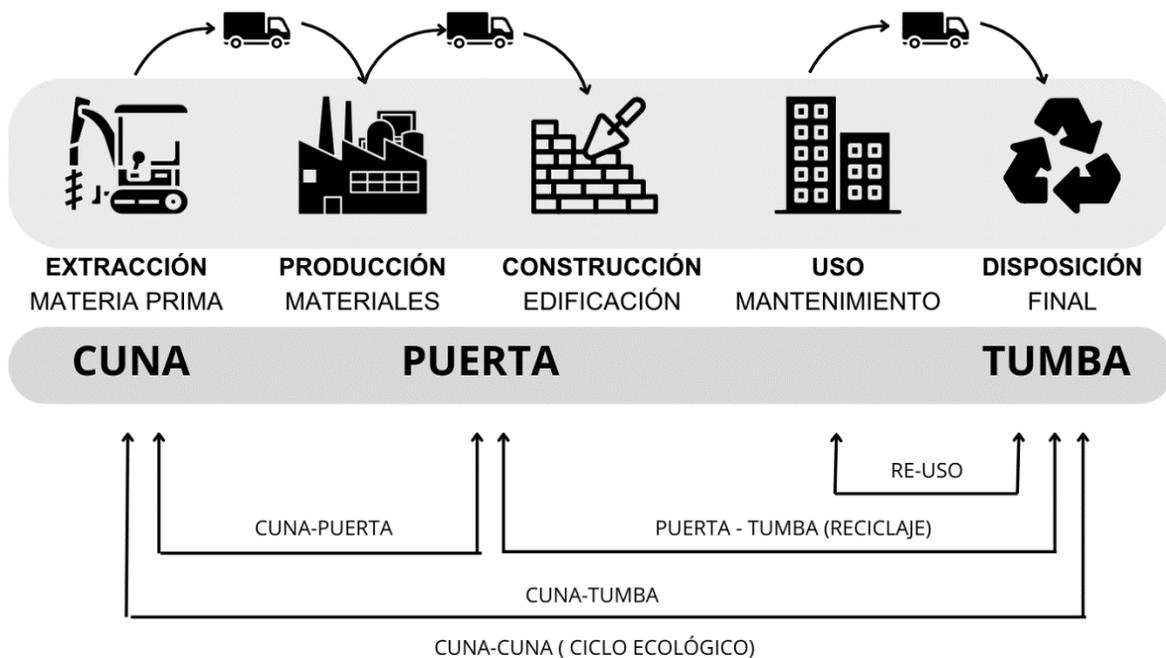


Figura 3:Esquema del ciclo ecológico. Creado por el autor

Esta metodología permite identificar cuáles son los momentos del ciclo de vida de la edificación donde más se emiten gases y más se consumen recursos. Por estas razones que un ACV cuidadoso puede ayudar a preservar recursos naturales, mitigar el cambio climático, mejorar la calidad del aire y del agua, y en general, promover el desarrollo sostenible. Adoptar aproximaciones más ecológicas en el diseño aporta beneficios económicos y se alinea con diferentes tipos de demandas y regulaciones ambientales. (Di Ruocco & Gaita, 2023)

En el mundo académico, existe una gran cantidad de artículos científicos sobre ACVs de diferentes tipos de edificaciones, algunos de los cuales se toman como referentes y se encuentran citados en esta monografía. La metodología y las herramientas para realizar un ACV varía entre investigaciones. En este caso se plantea utilizar el programa One click LCA, un programa de ciclo de vida orientado a la industria de la construcción, que, por medio de una licencia estudiantil, permite realizar un análisis de ciclo de vida completo y comparar diseños entre sí.

Este programa tiene acceso a herramientas y bases de datos de las cuales se logra obtener el inventario de algunos de los materiales y los factores de emisión necesarios para poder realizar los análisis.

Esta monografía Pretende realizar un análisis del ciclo de vida del habitáculo, prestándole especial atención a la huella de carbono del objeto de estudio. La huella de carbono de una edificación es un indicador clave en la evaluación de su impacto ambiental. Este concepto enuncia la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) liberadas a la atmósfera durante todo el ciclo de vida de una edificación, desde su concepción y construcción hasta su demolición. El resultado de esta huella se entrega en unidades (toneladas) de CO₂ equivalente (tonCO₂e), pero también incluye otros gases como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). (Paulsen & Sposto, 2013).

Para calcular la huella de carbono de una edificación, al igual que el resto de las huellas que permite calcular el ACV, primero se debe determinar el alcance y decidir que etapas del ciclo de vida se van a tener en cuenta. En general, se consideran 3 alcances alcance 1 (emisiones directas), alcance 2 (emisiones indirectas asociadas con la energía) y alcance 3 (otras emisiones indirectas, como las relacionadas con la cadena de suministro y transporte) (ISO 14040:2006, 2006). En segundo lugar, Se deben recopilar datos lo más detallado posible sobre todas las actividades y procesos asociados con la edificación a lo largo de su ciclo de vida. Esto incluye la cantidad, tipo y origen de los materiales de construcción, el consumo de energía durante la construcción y operación, los desplazamientos de usuarios y trabajadores, entre otros (Ortiz et al., 2010). Después, se procede a calcular las emisiones de CO₂ (o GEI, en general) para cada actividad en cada etapa del ciclo de vida, para finalmente convertirlas en unidades de CO₂ equivalentes, para poder compararlas y que tenga sentido (IPCC, 2013).

Con la huella de carbono calculada, se procedería a realizar el análisis de los resultados. Y así lograr identificar en que actividades y momentos se encuentran las mayores concentraciones de CO₂, para poder proponer modificaciones u otro tipo de soluciones que permitan mejorar el desempeño ambiental, en este caso, el desempeño energético de la edificación, que sería el siguiente paso por seguir, según los objetivos de esta monografía.

Por medio de la comparación entre ACVs, ya sea de diferentes alternativas del mismo diseño, con modificaciones en la elección del tipo y origen de materiales, sistemas y métodos constructivos, o estrategias de eficiencia energética, o edificaciones distintas con características similares, se pueden llegar a conclusiones que enriquecen mucho el proceso de diseño, y que generen reflexiones en cuanto a que tipo de decisiones tomar.

5. Marco contextual

La construcción de la cual se estarán evaluando las huellas hace parte de un proyecto de investigación que seguirá en desarrollo durante la publicación de esta monografía. La referencia formal del proyecto es *P02: Prototipo de sistema habitable modular en elementos constructivos no estructurales*, con código 1216-938-106394, y pertenece al programa “Programa 938 Energía: Eficiencia Energética 2030: Transición hacia la construcción sostenible” de la convocatoria

938-2023 CONVOCATORIA ECOSISTEMAS EN ENERGÍA SOSTENIBLE, EFICIENTE Y ASEQUIBLE, del Programa Nacional o área de MinCiencias al cual se encuentra adscrito el proyecto.

Al ser un proyecto en desarrollo, el planteamiento del mismo todavía está en etapa preliminar, pero de forma sintética, los lineamientos de este proyecto, inicialmente, proponen la construcción de 2 prototipos iguales ubicados en 2 locaciones diferentes; el primero, en el Eco campus laureles, y el segundo en la universidad EIA. Esto con el objetivo realizar los estudios pertinentes en 2 contextos físico- espaciales diferentes, con climas diferentes, y evaluar cómo puede variar el desempeño ambiental de los materiales elegidos en diferentes contextos.

A través de este proyecto se espera poder realizar mediciones de propiedades de materiales para envolventes, tanto fabricados en laboratorio como materiales comerciales que ya están en el mercado, con el objetivo de evaluar la eficiencia energética de los mismos.

Este proyecto es el predecesor de la Eovilla UPB. La Ecovilla UPB es un prototipo de vivienda prefabricada diseñada por el equipo de trabajo de Estudio Central y el SEC (Smart Energy center). Fue construida en el 2023 en el campus de Laureles de la Universidad Pontificia Bolivariana, en Medellín, Colombia.

La Universidad Pontificia Bolivariana es una Institución privada de Educación Superior sin ánimo de lucro, con un compromiso tangible en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que se materializa en los aportes de las publicaciones científicas

y en el despliegue de nuestro Plan de Desarrollo Institucional de cara a las metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. (Reporte UPB sostenibilidad, 2022.)

Según su política de sostenibilidad, “La Universidad Pontificia Bolivariana, en el contexto de su Misión y su Visión, y en consonancia con el desarrollo sostenible, gestiona sus macroprocesos y orientaciones estratégicas en relación con los sectores público, privado y social. Con esto busca contribuir mediante impactos positivos a la construcción de una sociedad en paz, innovadora, creativa, solidaria y justa; a una economía próspera, incluyente y equitativa; y a un planeta que alberga toda forma de vida, en aras de la transformación social y humana”. (*Sostenibilidad | UPB*, n.d.)

Como se menciona en el último reporte de sostenibilidad de la UPB, “Nuestra apuesta por el emprendimiento, la innovación y la investigación, sigue siendo una premisa del desarrollo institucional, que hace parte del ADN organizacional y nos convoca a nuevos retos internacionales” (Reporte UPB sostenibilidad, 2022.). Es así, como proyectos como la Ecovilla UPB surgen.

La Ecovilla es construida a partir de un sistema modular industrializado que cuenta con una patente de invención científica. Como escribe su Autor, Alejandro Restrepo, “En un contexto en el cual los sistemas constructivos tradicionales aún no resuelven completamente el déficit de la vivienda popular en Colombia, la industrialización de sus componentes estructurales y la individualización de sus elementos no estructurales es una alternativa para mejorar la calidad habitacional a bajos costos y en menores tiempos con respecto a los sistemas de construcción convencional”. (Restrepo-Montoya, 2020)

Este sistema, entonces, se plantea como sistema constructivo alternativo que logra reducir los costos totales hasta en un 15% con respecto a los costos de vivienda de interés prioritario VIP y el tiempo de construcción puede ser hasta de un 50% con respecto a los sistemas constructivos tradicionales. (Restrepo-Montoya, 2020)

Según la encuesta nacional de calidad de vida ECV realizada por el DANE, en el 2021, “la cantidad de hogares que habitaba en viviendas distintas de tradicional indígena era de 16.908 miles. De esos hogares, 5.240 miles (que equivalen al 31,0%) se encontraban en déficit habitacional. El 7,5% de los hogares que habitaban viviendas distintas de tradicional indígena se hallaba en déficit cuantitativo (es decir, ocupaba viviendas con deficiencias estructurales o de espacio), mientras que el 23,5% tenía déficit cualitativo

(habitaba en viviendas con deficiencias no estructurales).” (DANE,2021). Por motivos como este, el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial elabora una serie de guías de asistencia técnica para vivienda de interés social, “con el objeto de entregar una herramienta metodológica para la formulación, ejecución y puesta en marcha de proyectos de vivienda de interés social, como apoyo a los entes territoriales que a diario se enfrentan a la tarea de buscar disminuir el déficit cuantitativo de vivienda en sus municipios” (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, No. 1).

En esta serie de 4 guías se abordan temas como la calidad en la vivienda y sus parámetros mínimos, los materiales y calidad de estos, cuyas características se verán reflejadas en la sostenibilidad humana y social de la vivienda, las responsabilidades normativas de los ejecutores de estos planes de vivienda, y los procedimientos generales de la política de vivienda subsidiados con recursos del estado.

Como parte del lineamiento necesario para cumplir los ODS en Colombia, es necesario acabar o disminuir el déficit de vivienda, por esto, alternativas arquitectónicas y constructivas como la presentada anteriormente, con procesos de “Industrializar lo esencial, individualizar lo necesario y transformar lo ideal” (Restrepo-Montoya, 2020) se puede contribuir a que se planteen y desarrollen proyectos de buena calidad para los colombianos.

Dentro de los marcos de vivienda de buena calidad, entonces, y después de comprender la importancia de la sostenibilidad en el mundo actual, el valor agregado que un ACV tiene en la toma de decisiones de diseño, indispensable conocer qué tipo de lineamientos existen, que guíen a los constructores y diseñadores en este proceso. La norma internacional que regula la gestión ambiental de productos manufacturados y consumidos, a través del ACV, es la ISO 14040:2006, la cual define que un ACV debe tener 4 fases de estudio. Definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto ambiental e interpretación. Esta norma es adoptada o interpretada por los diferentes países, para incluirse en sus lineamientos jurídicos. En Colombia, el instituto colombiano de normas, técnicas y certificación ICONTEC, realiza una adopción idéntica por traducción (IDT), de la norma ISO 14040:2006, generando la NTC-ISO 14040.

6. Metodología

Tabla 1: Metodología

OBJETIVO: ACV DE LOS MATERIALES DE LA ENVOLVENTE		
1. DEFINIR ALCANCE DEL ANÁLISIS		
PROPÓSITO	RECURSOS	FECHAS
<ul style="list-style-type: none"> Definir que etapas del ciclo se tendrán en cuenta Definir que materiales se analizarán Definir que huellas se medirán 	<ul style="list-style-type: none"> Reunión con Felipe Lalinde y el equipo de investigación Información sobre los materiales para realizar fichas técnicas Borrador ficha técnica 	SEMANA 3-4
2. APROXIMACIÓN AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO		
Definir dimensiones y materialidad de: <ul style="list-style-type: none"> Generales del habitáculo Cimentación Estructura Envolvente Suelo Cubierta 	<ul style="list-style-type: none"> Autocad, revit, sketchup Referente para el diseño de habitáculos para bancos de pruebas 	SEMANA 7-8
3. REALIZAR EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)		
Conocer el desempeño ambiental de los materiales elegidos previamente, enfocándose en las huellas de carbono, hídrica y energética	<ul style="list-style-type: none"> Herramientas para la simulación de análisis de ciclo de vida como Open LCA Bases de datos con inventarios de ciclo de vida alternas Apoyo de profesores Excel o diagramas de flujo 	SEMANA 9-10

OBJETIVO: EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ACV**4. TABLA SINTESIS DE RESULTADOS****PROPÓSITO**

Sintetizar la información recolectada en el ACV de manera que sea legible, digerible y permita establecer comparaciones entre materiales

RECURSOS

- Resultados del ACV
- Canva, photoshop o illustrator para la realización de la tabla

FECHAS

SEMANA 10-12

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Despues de los resultados encontrados en el punto anterior, se busca establecer comparaciones entre los resultados de las huellas del material de laboratorio y su equivalente comercial

- Resultados del ACV
- Canva, photoshop o illustrator para la realización de la tabla

SEMANA 12-13

6. ESTABLECIMIENTO DE CONCLUSIONES

Se busca plantear unas conclusiones basandose sen toda la información recolectada que permita ser propositvos en términos de ecodiseño

- Resultados del ACV
- Canva, photoshop o illustrator para la realización de la tabla

SEMANA 12-13

OBJETIVO: PROPUESTAS DESDE EL ECODISEÑO**7. ESTRATEGIAS DE ECODISEÑO****PROPÓSITO**

Enunciar que tipo de mejoras se le podrían realizar al habitáculo en términos de ecodiseño para mejorar el desempeño ambiental del mismo

RECURSOS

- Resultados del ACV
- Referentes sobre ecodiseño

FECHAS

SEMANA 12-14

8. CERTIFICACIONES AMBIENTALES

Establecer que tipo de certificaciones ambientales o de sostenibilidad podrían obtener los materiales según sus propiedades y desempeños en el ACV

- Resultados del ACV
- Normativa nacional
- Normativa internacional
- Tipologías de certificaciones ambientales para productos constructivos

SEMANA 12-14

9. MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE CO2

Enunciar de que manera se podrían compensar los gastos energéticos que se incurrieron en la producción de los materiales para apuntar a un material carbono neutral

- Resultados del ACV
- Conocimiento sobre los mecanismos de compensación de CO2 existentes

SEMANA 12-14

v

7.1.2 Etapas del ciclo de vida que se tendrán en cuenta en el análisis.

Este ACV propone un alcance de la cuna a la puerta, (cradle to gate) donde se tendrán las huellas ambientales producidas desde la extracción de materias primas hasta la producción y transporte de los materiales a la obra, utilizando una vida útil de 10 años. Para el alcance que puede tener esta monografía se considera que mediante el estudio de estas etapas del ciclo se pueden llegar a conclusiones suficientemente valiosas.

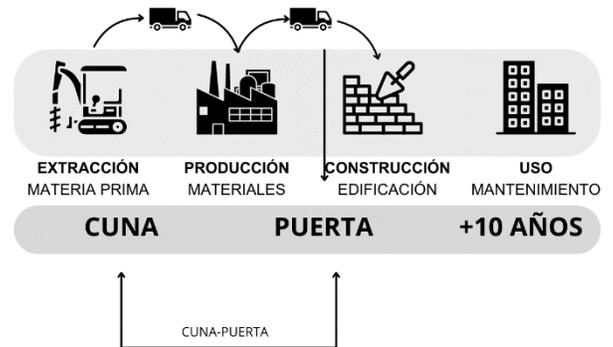


Figura 5: Esquema Cradle to grave. Creado por el autor

7.1.3 Materiales a analizar

El proyecto busca realizar mediciones de las propiedades de materiales creados en laboratorio y compararlos con materiales comerciales en el mercado. Por el momento se plantea el análisis de los siguientes materiales:

****No se tiene en cuenta el material de ladrillo estructural dentro del análisis por falta de información disponible con respecto al mismo.***

MATERIALES A ANALIZAR

MATERIALES COMERCIALES	MATERIALES DE LABORATORIO
<p style="text-align: center; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">PLACA DE SUPER BOARD</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.9em;">Placa de cemento fraguada mediante el proceso AUTOCLAVE (alta presión, humedad, alta temperatura), lo que sumado a una selección de materia prima (mezcla de cemento y refuerzos orgánicos) permite alcanzar un nivel inigualable de estabilidad y resistencia.</p> </div> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">USOS: Entrepisos, bases para techos, fachadas</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">M.O.R: >=10 MPA</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">M.O.RESISTENCIA MECÁNICA</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">DIMENSIONES: 1,22 x 2, 44 m. E. variable desde 6mm</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">PESO ESPECÍFICO: 11.02 kg/m²</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">COLOR: Crema</p> <p style="font-size: 0.8em;">Textura: Lisa</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">PLACA DE GRC</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.9em;">El término GRC es un compuesto de una matriz de mortero reforzado con fibra de vidrio resistente a los álcalis del cemento, cuya proporción debe estar comprendida entre un 4 y un 5% del peso total de la mezcla. Se trata de un elemento de hormigón prefabricado autoportante armado con fibra de vidrio y cuyo</p> </div> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">USOS: Fachadas, nuevos usos.</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">M.O.R: 12- 25 MPA</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">RESISTENCIA MECÁNICA</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">DIMENSIONES: Variable. se proponen placas de 61x61 cm</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">PESO ESPECÍFICO:</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">COLOR: Gris</p> <p style="font-size: 0.8em;">Textura: Variable</p>
<p style="text-align: center; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">LADRILLO BOCADILLO</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.9em;">pieza de arcilla cocida de tipo liso con perforación vertical estructural color natural para fachada y exteriores.</p> </div> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">USOS: Muros no portantes interiores y exteriores</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">M.O.R:</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">RESISTENCIA MECÁNICA 9,35 mpa a compresión</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">DIMENSIONES: 6 x 11,5 x 24 cm</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">PESO ESPECÍFICO: 2kg/ unidad</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">COLOR: Natural</p> <p style="font-size: 0.8em;">Textura: Lisa</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">LADRILLO ESTRUCTURAL CON DOBLE CAVIDAD VERTICAL (8 CM X 7 CM)</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.9em;">Producido mediante geopolimerización de minerales residuales. Es una opción sustentable, costo-eficiente y estética. Cumple normativa técnica NTC 4076: unidad de mampostería estructural liviana clase alta. Es equiparable con unidades de mampostería de arcilla cocida no estructural clase PV para interiores y exteriores.</p> </div> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">USOS: Muros divisorios y portantes, cercos, tabiques .</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">M.O.R:</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">RESISTENCIA MECÁNICA: 22 mpa a compresión</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">DIMENSIONES: 6 x 12 x 24 cm</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">PESO ESPECÍFICO: 1.7 kg</p> <p style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">COLOR: gris oscuro</p> <p style="font-size: 0.8em;">Textura: Lisa</p>

Figura 6: Fichas técnicas materiales. Creado por el autor

7.1.4 Huellas a evaluar

El análisis se acota al cálculo de la huella de carbono y se presentará en términos de Toneladas de Dióxido de carbono equivalente (Ton CO₂eq)

7.2 Aproximación al diseño del habitáculo

7.2.1 Dimensiones

Dentro de la aproximación al diseño del habitáculo se llevó a cabo un proceso de reflexión para definir unas dimensiones que se adaptaran tanto a las capacidades de producción de los fabricantes como a los materiales comerciales en el mercado.

Utilizando como argumentos principales la modularidad, el fácil ensamblaje de la estructura y los paneles, la flexibilidad espacial y la habitabilidad, se plantean 3 propuestas de pre diseño donde se comienzan a evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Propuesta 1: habitáculo de 3.00 x 2.40 m

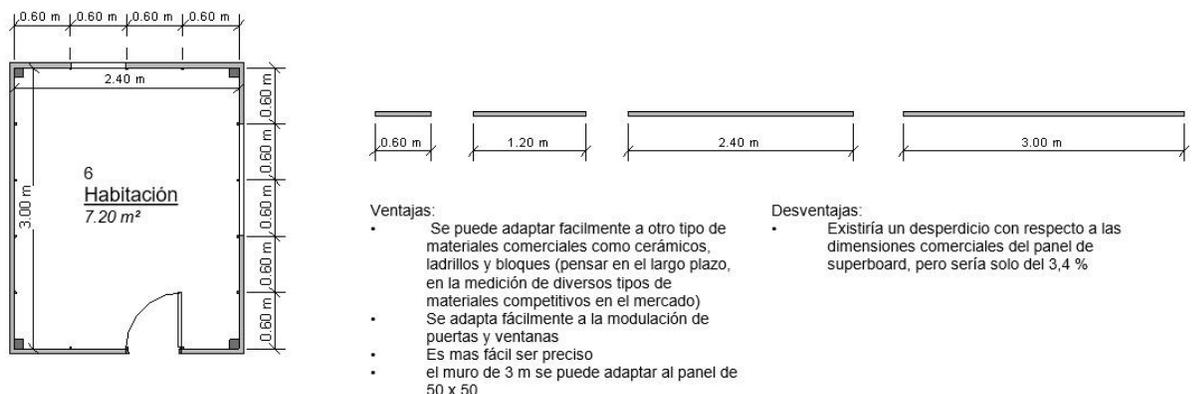


Figura 7: Propuesta 1. Creado por el autor

Propuesta 2: Habitáculo de 3.05 x 2.40 m

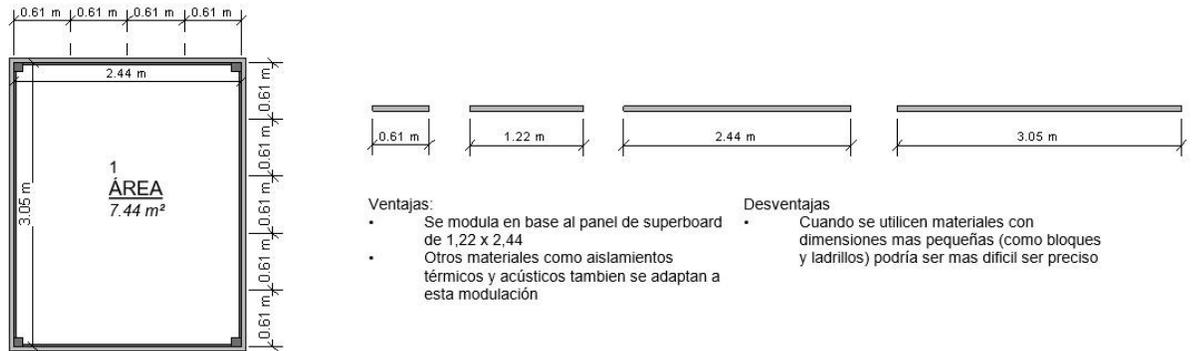


Figura 8: Propuesta 2 - Habitáculo de 3.05 x 2.40 m

Propuesta 3: Habitáculo de 3.00 x 2.50 m

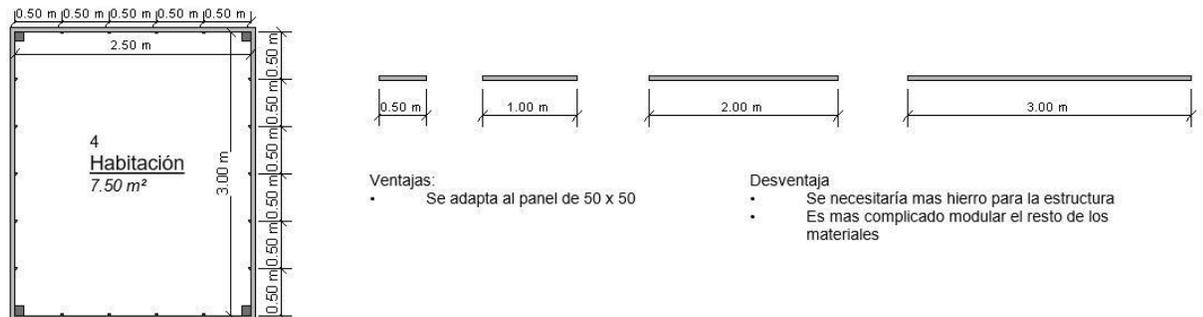


Figura 9: Propuesta 3 - Habitáculo de 3.00 x 2.50 m

OBSERVACIONES GENERALES

- Importante que el habitáculo sea habitable y no solo un laboratorio de pruebas de los materiales, para poder dar diagnósticos más completos. pensar que así se pueden hacer una mayor diversidad de experimentos, permitiendo que el proyecto evolucione más libremente en el futuro. (Cualquiera de los 3 serviría)
- Opino que las dimensiones mínimas deben ser 2,40 x 2,40 x 2,40 m para que el espacio funcione como una habitación pequeña, una sala o una oficina. más pequeño, el proyecto se vuelve más restringido

PENSAR EN

- como lograr que el habitáculo sea hermético
- como funcionaría el montaje y desmontaje de los paneles (como serían los perfiles o el sistema de racks)
- como lograr que pueda rotar
- como van a funcionar las estructuras del suelo y la cubierta para que también puedan estar aislados térmicamente
- Estructura adicional exterior que permita añadir protección solar en caso de ser necesario
- Que alteraciones adicionales se podrían necesitar en el largo plazo? (Geometría del techo, vanos en las paredes, etc)

Basándose en las reflexiones iniciales, se plantea una segunda aproximación al diseño, donde se opta por continuar por la línea de la propuesta #2, donde el espacio se modula según las medidas estandarizadas del panel de superboard de 1,22 m x 2,44 m.

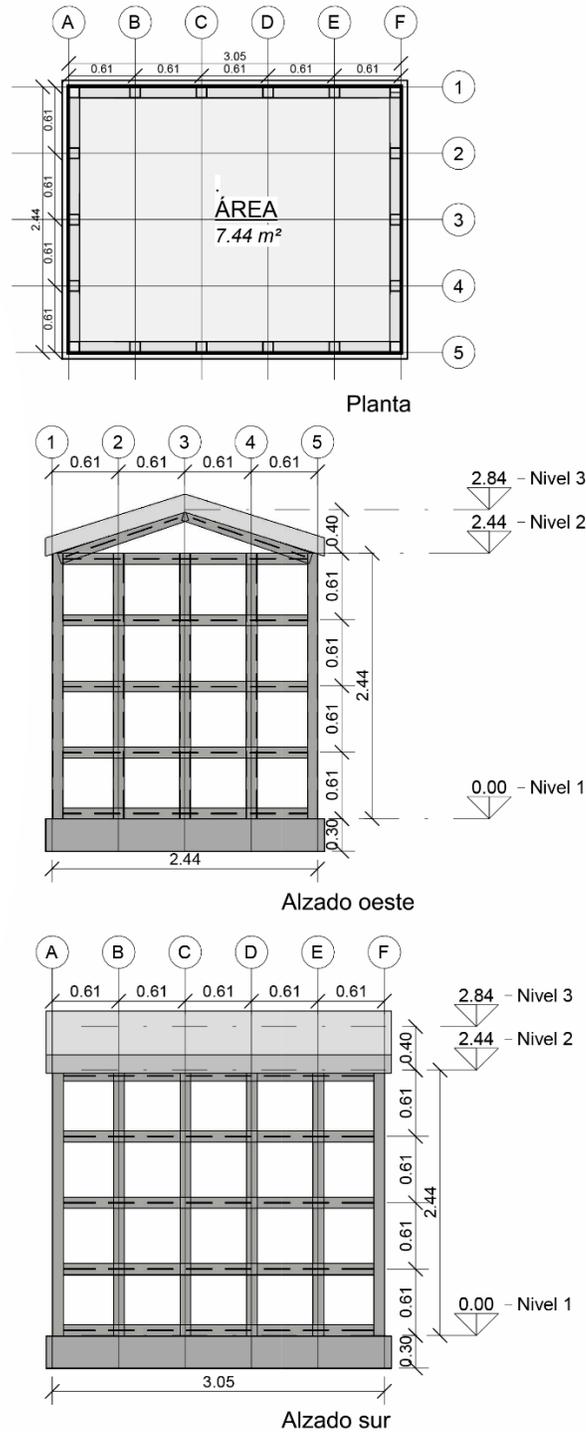


Figura 10: Esquema planimétrico habitáculo. Creado por el autor

7.2.4 Envoltente:

- **Material 1:** Placa de Super board: 122 cm x 244 cm
- **Material 2:** Placa de GRC: 61 cm x 61 cm
- **Material 3:** Ladrillo bocadillo: 6 cm x 12 cm x 24 cm
- **Material 4:** Ladrillo estructural: 6 cm x 12 cm x 24 cm
- **Puerta:** Se propone el uso de una puerta de medidas estándar de 100 x 210 cm. El marco de la puerta se adaptará a la modulación de los paneles.
- **Ventanas:** Se propone que las dimensiones de la ventana también se adapten a la modulación de la estructura.
-

Tabla 4. Cantidades envoltente. Realizada por el autor

<Cantidades muros>			
A	B	C	D
Familia y tipo	Anchura	Altura desconectad	Área
Muro básico: Panel - 10 mm			
Muro básico: Panel	0.01	2.44	6.00 m ²
Muro básico: Panel	0.01	2.44	7.44 m ²
Muro básico: Panel	0.01	2.44	6.00 m ²
Muro básico: Panel	0.01	2.44	7.44 m ²
Muro básico: Panel - 10 mm: 4			26.89 m ²
Total general: 4			26.89 m ²

Cantidad de envoltente: 27 m2

***No se tiene en cuenta el material 4, la puerta, las ventanas y la envoltente dentro del ACV del prototipo.**

7.3 Realización del análisis

7.3.1 Diagramas de flujo de los materiales.

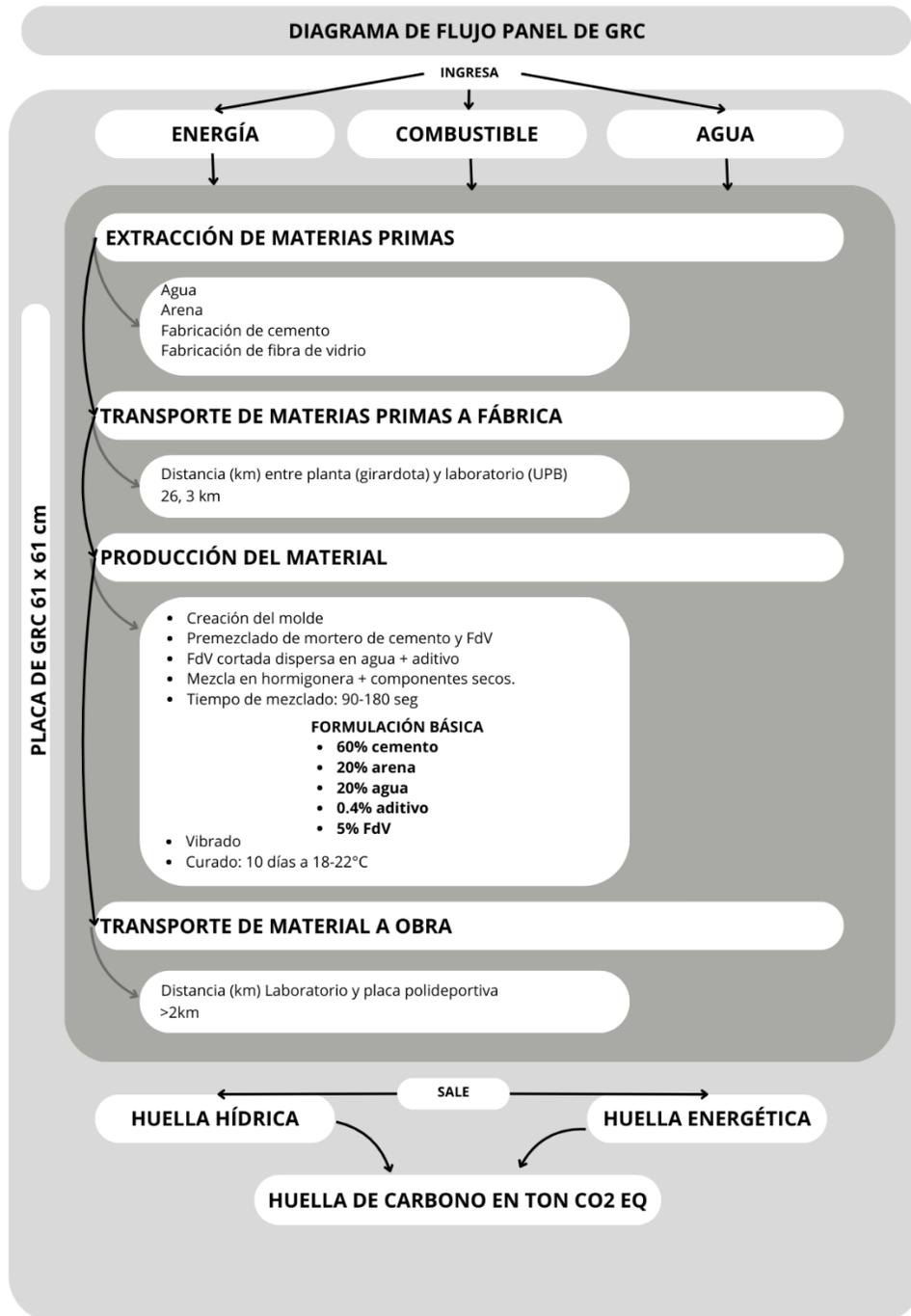


Figura 11: Diagrama de Flujo placa GRC. Creado por el autor

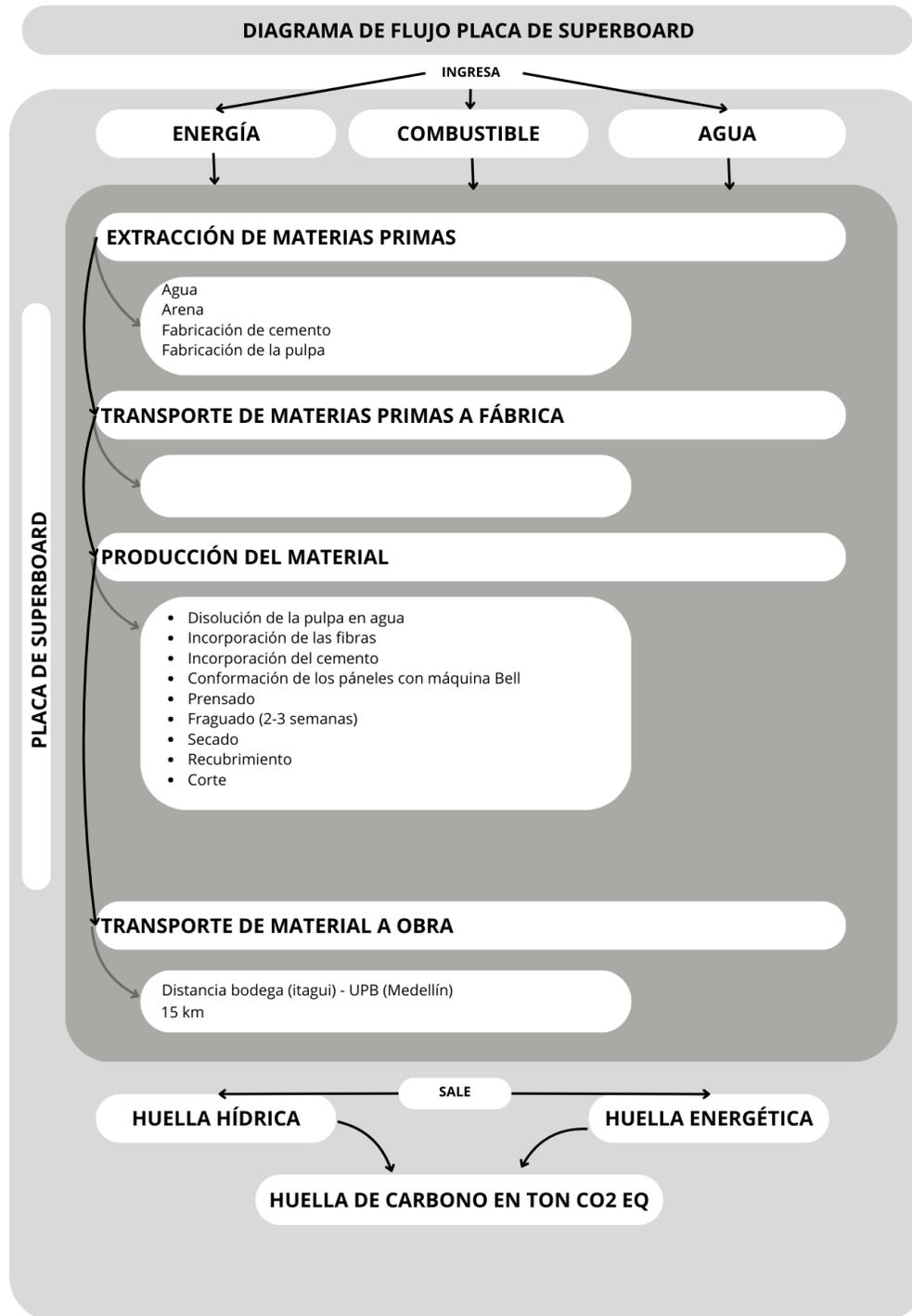


Figura 12: Diagrama de flujo Placa Superboard. Creado por el autor

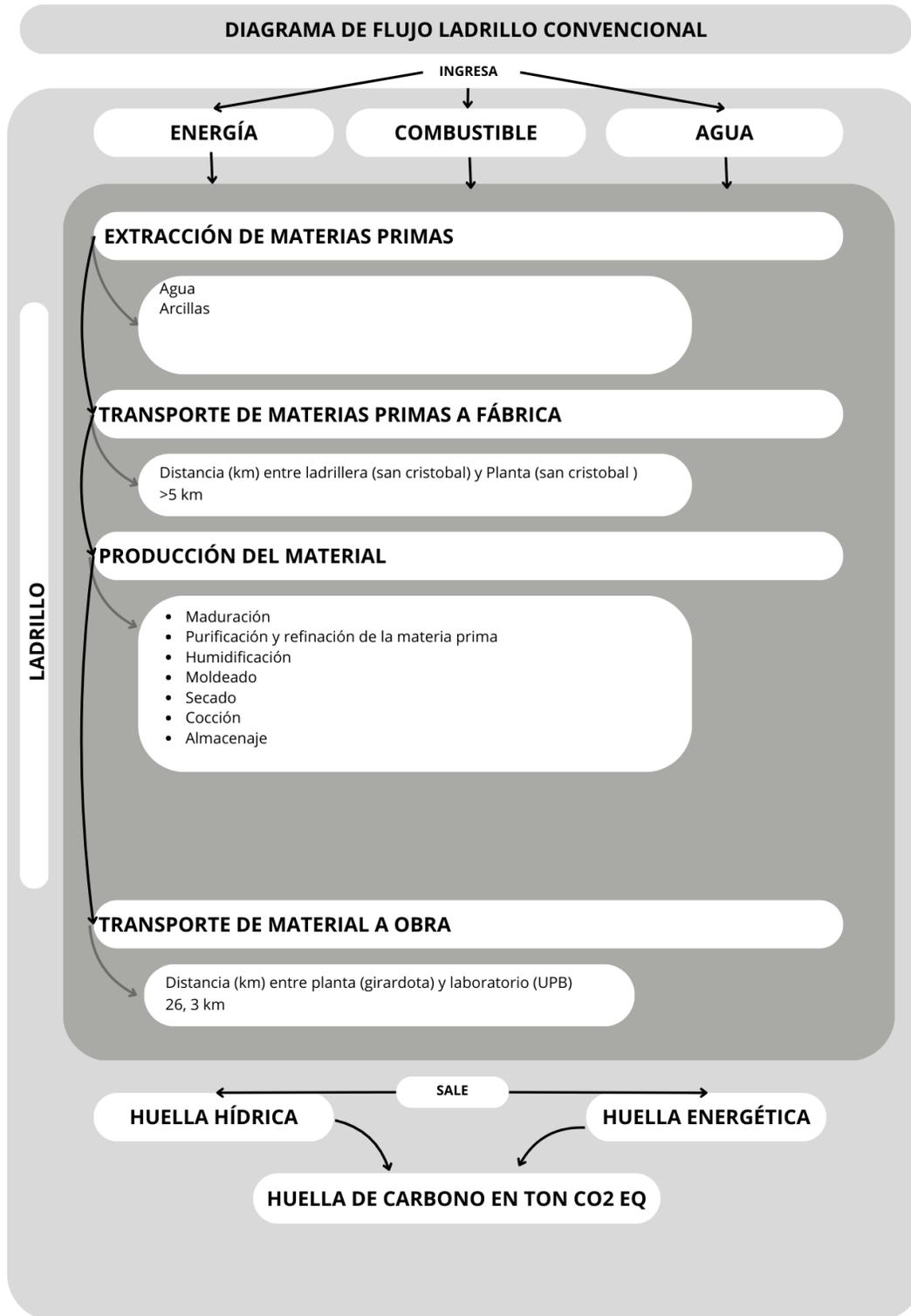


Figura 13: Diagrama de flujo ladrillo convencional. Creado por el autor

Figura 14 Diagrama de flujo Ladrillo estructural. Creado por el autor

8. Resultados

Los resultados de este ACV de hacen bajo la norma **ISO 14040 & ISO 14044 (CML 2002; noviembre 2012)**

8.1 Evaluación de resultados

Se realizan 3 ACV del habitáculo donde la cimentación y la estructura se mantiene constante se realizan variaciones en la envolvente.

RESULTADOS ACV
HABITÁCULO CON ENVOLVENTE EN PANEL DE GRC

3 Tonnes CO₂e [Ⓢ]

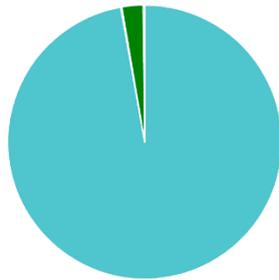
43.7 kg CO₂e / m² / year [Ⓢ]

163 € Social cost of carbon [Ⓢ]

Result category	Global warming kg CO ₂ e [Ⓢ]	Ozone Depletion kg CFC11e [Ⓢ]	Acidification kg SO ₂ e [Ⓢ]	Eutrophication kg PO ₄ e [Ⓢ]	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee [Ⓢ]	Depletion of nonrenewable energy MJ	Biogenic carbon storage kg CO ₂ e bio [Ⓢ]	
A1-A3 [Ⓢ] Construction Materials	3,16E+03	TRIAL	1,01E+01	1,82E+00	TRIAL	4,04E+04	0,00E+00	Details
A4 [Ⓢ] Transportation to site	4,34E+00	TRIAL	5,65E-03	1,23E-03	TRIAL	3,49E+01		Details
C1-C4 [Ⓢ] End of life	8,70E+01	TRIAL	4,10E-01	8,66E-02	TRIAL	2,45E+03		Details
Total	3,26E+03	TRIAL	1,08E+01	1,91E+00	TRIAL	4,28E+04	0,00E+00	
Results per denominator								
Gross Internal Floor Area (PMS/RICS) 7.44 m ²	4,37E+02		1,42E+00	2,57E-01		5,76E+03	0,00E+00	

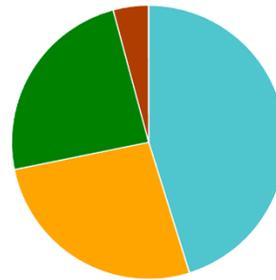
Global warming kg CO₂e - Life-cycle stages

- A1-A3 Materials - 97.2%
- A4 Transport - 0.1%
- C2 Waste transport - 2.5%
- C3 Waste processing - 0.2%



Global warming kg CO₂e - Classifications

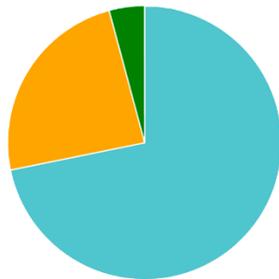
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 45.2%
- Columns and load-bearing vertical structures - 26.6%
- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 24.0%
- External walls and facade - 4.2%



Global warming kg CO₂e - Resource types

This is a drilldown chart. Click on the chart to view details

- Structural steel and steel profiles - 71.8%
- Ready-mix concrete, high strength - 24.0%
- Fibre cement products - 4.2%



Mass kg - Classifications

- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 72.1%
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 14.6%
- Columns and load-bearing vertical structures - 8.6%
- External walls and facade - 4.7%

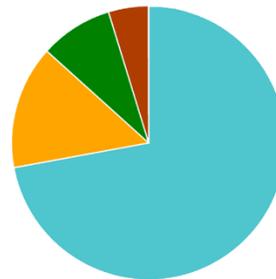


Figura 15 Resultados ACV Panel GRC. Gráficos de One click LCA

**RESULTADOS ACV
HABITÁCULO CON ENVOLVENTE EN PANEL DE SUPERBOARD**

3 Tonnes CO₂e [Ⓢ]

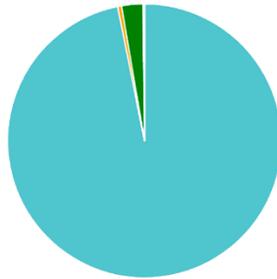
43.5 kg CO₂e / m² / year [Ⓢ]

162 € Social cost of carbon [Ⓢ]

Result category	Global warming kg CO ₂ e [Ⓢ]	Ozone Depletion kg CFC11e [Ⓢ]	Acidification kg SO ₂ e [Ⓢ]	Eutrophication kg PO ₄ e [Ⓢ]	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee [Ⓢ]	Depletion of nonrenewable energy MJ	Biogenic carbon storage kg CO ₂ e bio [Ⓢ]
A1-A3 [Ⓢ] Construction Materials	3,13E+03	TRIAL	1,00E+01	1,80E+00	TRIAL	4,01E+04	7,88E+00
A4 [Ⓢ] Transportation to site	1,46E+01	TRIAL	0,00E+00	0,00E+00	TRIAL	0,00E+00	
C1-C4 [Ⓢ] End of life	8,70E+01	TRIAL	4,10E-01	8,65E-02	TRIAL	2,45E+03	
Total	3,24E+03	TRIAL	1,05E+01	1,88E+00	TRIAL	4,26E+04	7,88E+00
Results per denominator							
Gross Internal Floor Area (IPMS/RICS) 7.44 m ²	4,35E+02		1,40E+00	2,53E-01		5,72E+03	1,06E+00

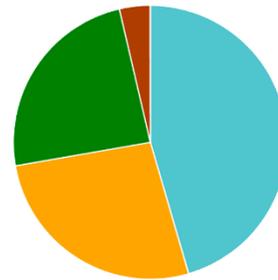
Global warming kg CO₂e - Life-cycle stages

- A1-A3 Materials - 96.9%
- C2 Waste transport - 2.5%
- A4 Transport - 0.5%
- C3 Waste processing - 0.2%



Global warming kg CO₂e - Classifications

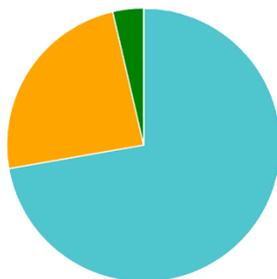
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 45.5%
- Columns and load-bearing vertical structures - 26.7%
- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 24.1%
- External walls and facade - 3.6%



Global warming kg CO₂e - Resource types

This is a drilldown chart. Click on the chart to view details

- Structural steel and steel profiles - 72.2%
- Ready-mix concrete, high strength - 24.1%
- Fibre cement products - 3.6%



Mass kg - Classifications

- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 72.3%
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 14.6%
- Columns and load-bearing vertical structures - 8.6%
- External walls and facade - 4.5%

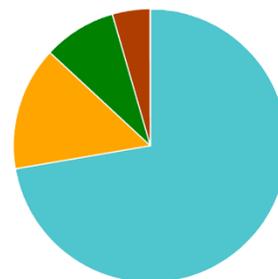


Figura 16 Resultados ACV placa de Superboard. Gráficos de One Click LCA

RESULTADOS ACV
HABITÁCULO CON ENVOLVENTE EN LADRILLO

3 Tonnes CO₂e [?]

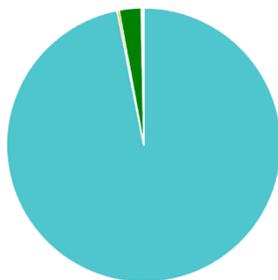
44.93 kg CO₂e / m² / year [?]

167 € Social cost of carbon [?]

Result category	Global warming kg CO ₂ e [?]	Ozone Depletion kg CFC11e [?]	Acidification kg SO ₂ e [?]	Eutrophication kg PO ₄ e [?]	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee [?]	Depletion of nonrenewable energy MJ	Biogenic carbon storage kg CO ₂ e bio [?]
A1-A3 [?] Construction Materials	3,24E+03	TRIAL	1,05E+01	1,89E+00	TRIAL	4,18E+04	0,00E+00
A4 [?] Transportation to site	9,01E+00	TRIAL	5,65E-03	1,23E-03	TRIAL	3,49E+01	
C1-C4 [?] End of life	9,59E+01	TRIAL	4,63E-01	9,81E-02	TRIAL	2,64E+03	
Total	3,34E+03	TRIAL	1,09E+01	1,99E+00	TRIAL	4,44E+04	0,00E+00
Results per denominator							
Gross Internal Floor Area (IPMS/RICS) 7.44 m ²	4,49E+02		1,47E+00	2,67E-01		5,97E+03	0,00E+00

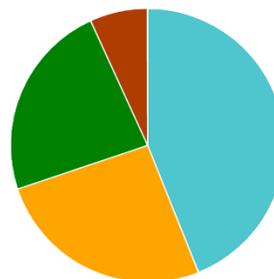
Global warming kg CO₂e - Life-cycle stages

- A1-A3 Materials - 96.9%
- C2 Waste transport - 2.6%
- C4 Waste disposal - 0.1%
- A4 Transport - 0.3%
- C3 Waste processing - 0.2%



Global warming kg CO₂e - Classifications

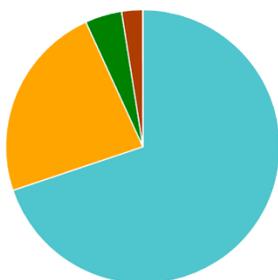
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 44.0%
- Columns and load-bearing vertical structures - 25.9%
- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 23.3%
- External walls and facade - 6.8%



Global warming kg CO₂e - Resource types

This is a drilldown chart. Click on the chart to view details

- Structural steel and steel profiles - 69.8%
- Ready-mix concrete, high strength - 23.3%
- Brick, common clay brick - 4.3%
- Mortar (masonry/bricklaying) - 2.5%



Mass kg - Classifications

- Foundation, sub-surface, basement and retaining walls - 60.1%
- External walls and facade - 20.6%
- Floor slabs, ceilings, roofing decks, beams and roof - 12.2%
- Columns and load-bearing vertical structures - 7.1%

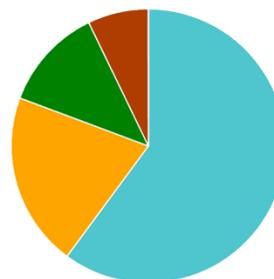
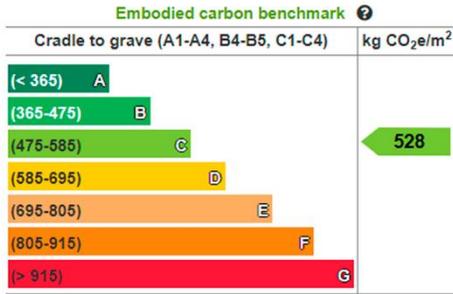


Figura 17 Resultados ACV ladrillo convencional. Gráficos de One Click LCA

8.2 Comparación de resultados

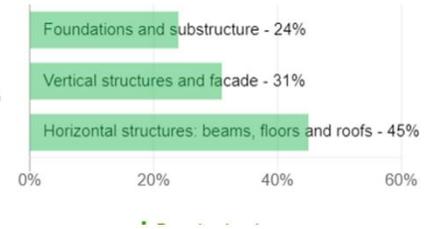
PANEL GRC



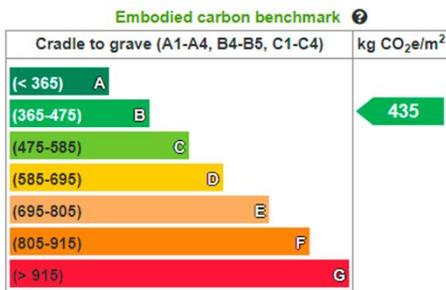
Embodied carbon by life-cycle stage



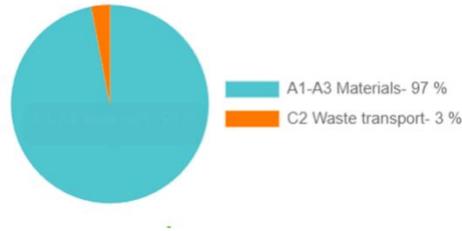
Embodied carbon by structure - A1-A3



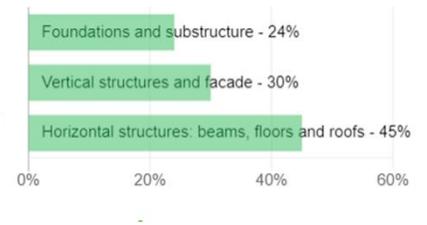
PANEL SUPERBOARD



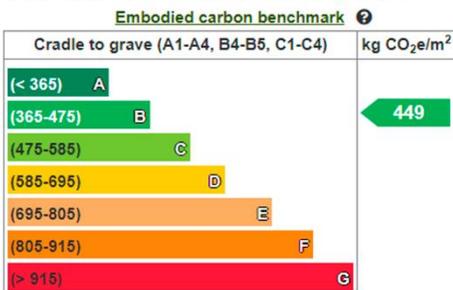
Embodied carbon by life-cycle stage



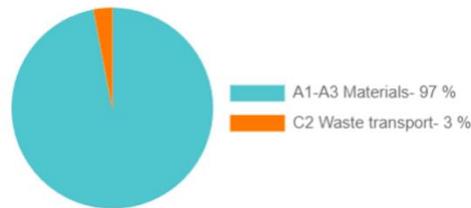
Embodied carbon by structure - A1-A3



LADRILLO CONVENCIONAL



Embodied carbon by life-cycle stage



Embodied carbon by structure - A1-A3

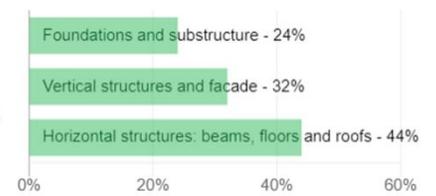


Figura 18 Carbono embebido. Graficos de One Click LCA

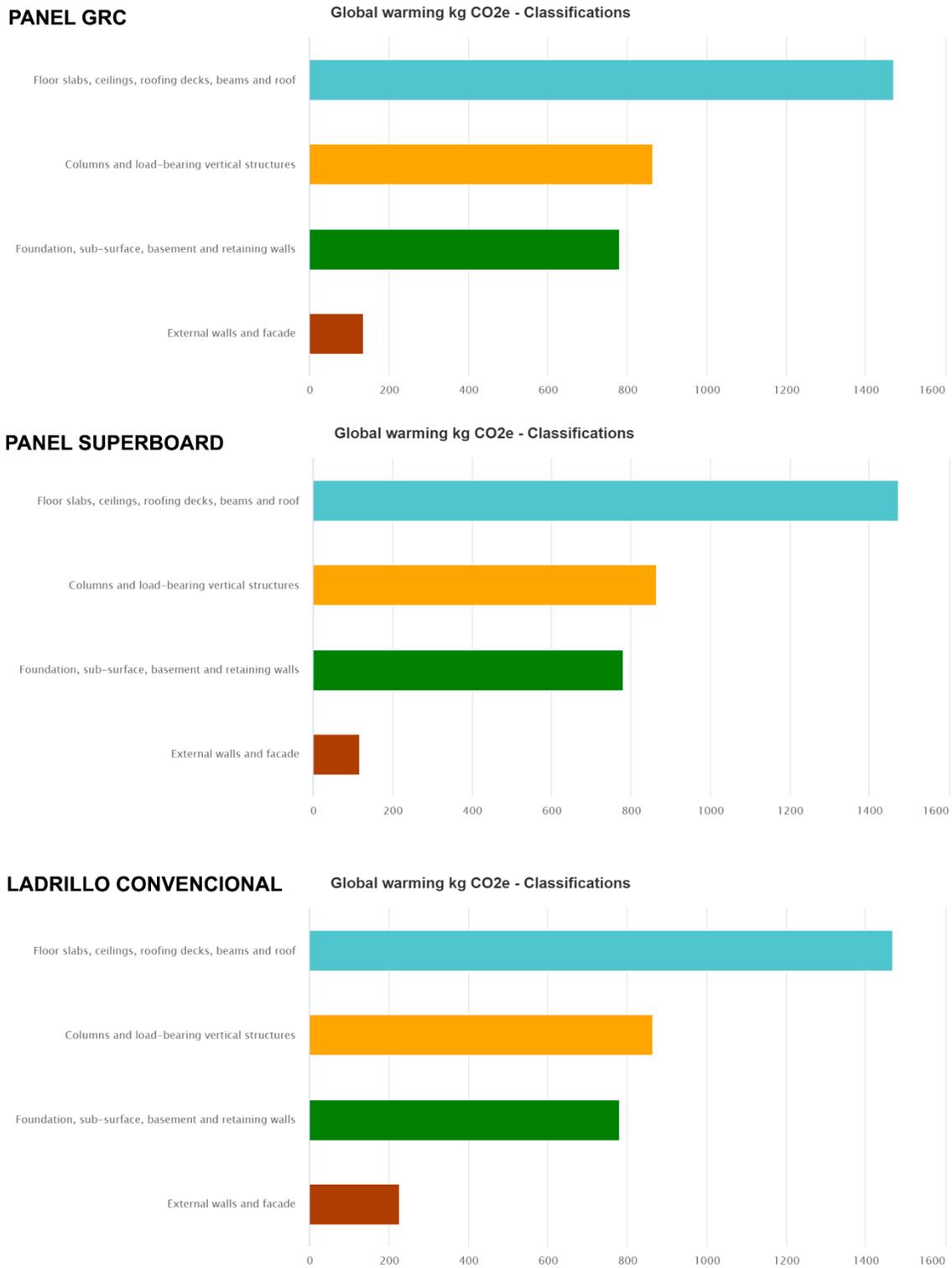
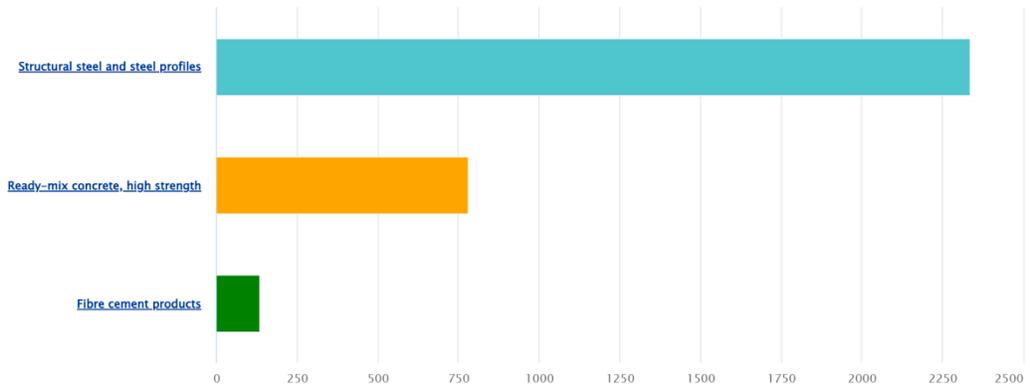


Figura 19. Comparación de Kg de CO2eq. Gráficos de One click LCA

PANEL GRC

Global warming kg CO2e - Resource types

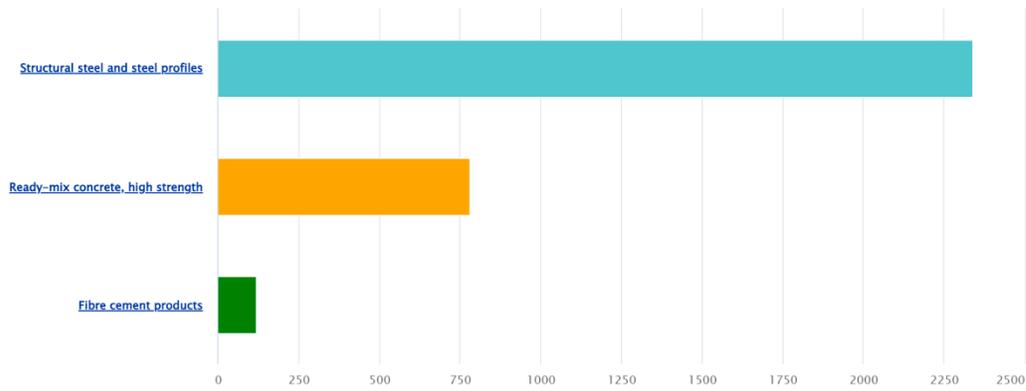
This is a drilldown chart. Click on the chart to view details



PANEL SUPERBOARD

Global warming kg CO2e - Resource types

This is a drilldown chart. Click on the chart to view details



LADRILLO CONVENCIONAL

Global warming kg CO2e - Resource types

This is a drilldown chart. Click on the chart to view details

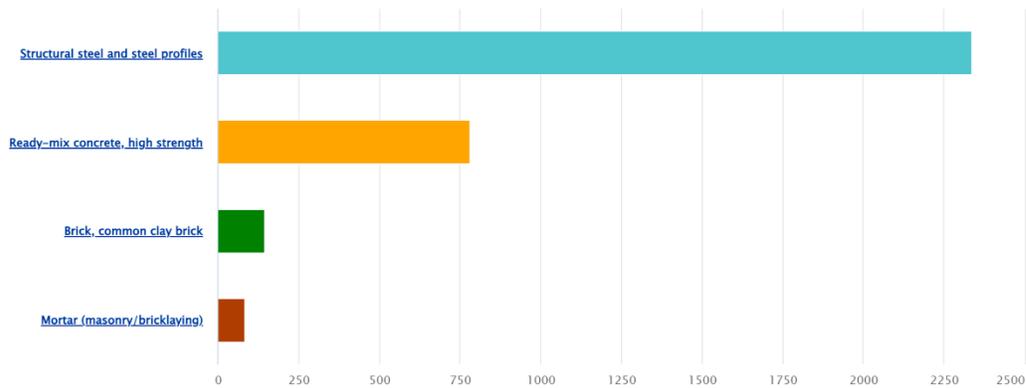


Figura 20 Kg de CO2 equivalente según recurso. Gráficos de One click LCA

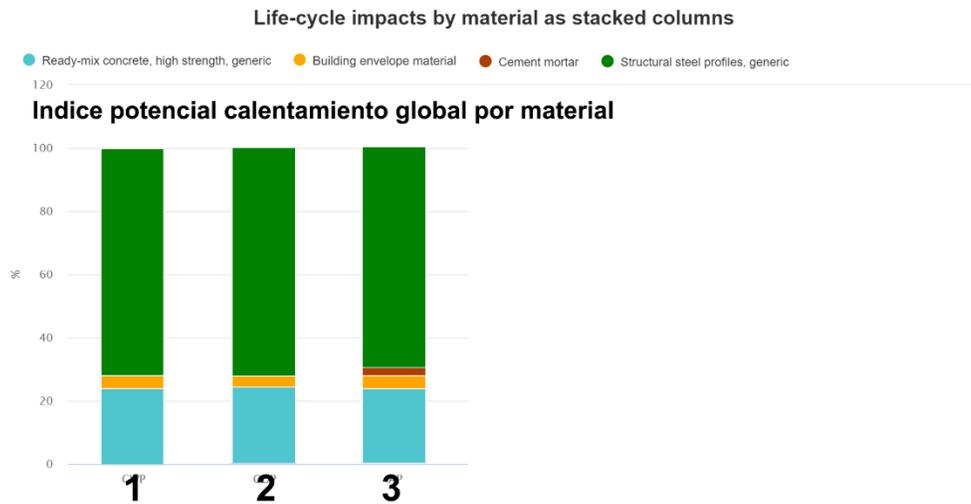


Figura 21 Índice potencial calentamiento global por material. Gráfico de One Click LCA

KG DE CO₂EQ POR MATERIAL DE LA ENVOLVENTE

1. **GRC:** 136 Kg
2. **SUPERBOARD:** 117 kg
3. **LADRILLO(+MORTERO):** 227 Kg

KG DE CO₂EQ/M² POR DISEÑO

1. **GRC:** 528 kg CO₂eq/m²
2. **SUPERBOARD:** 435 kg CO₂eq/m²
3. **Ladrillo:** 449 kg CO₂eq/m²

9. Estrategias de mejora desde el ecodiseño

Después de analizar los resultados, revisar las comparaciones entre materiales, y enunciar las conclusiones, estas son algunas de las decisiones que se podrían cambiar para mejorar el impacto ambiental del prototipo.

1. Se deja en evidencia que la estructura representa un impacto ambiental bastante significativo. Como la función principal del prototipo no es ser habitado, su etapa de uso no va a ser muy larga, y no hay claridad en cuanto a cómo podría ser la disposición final de esta, valdría la pena explorar alternativas diferentes a mandar a hacer una estructura en acero desde cero. Algunas de estas podrían ser:

- Encontrar la manera de utilizar residuos de otra obra que puedan ser readaptados, reutilizados o reciclados
- Recalculando la forma de la estructura, pues es probable que los perfiles de 10 cm de espesor estén sobredimensionados y por medio del uso de perfiles de otras dimensiones se pueda disminuir la cantidad de acero necesario para soportar los paneles
- Utilizando otro material estructural que tenga un menor impacto energético al acero y que permita cumplir con los requerimientos iniciales de portabilidad como el mass timber.
- En caso de que ninguna de estas alternativas sea factible, anticiparse a que otros usos podría tener esta estructura para extender su vida útil y justificar así el uso de acero, pensando en los principios de circularidad, pues, aunque dentro del alcance de esta investigación no se tuvo mucho en cuenta cual iba ser la disposición final del material, en la vida real esta es una etapa determinante en el impacto ambiental que pueda tener.

2. 2 de los 3 los materiales de la envolvente propuestos se eligen partiendo del hecho de tienen cierto nivel de eficiencia energética. Esta fue una decisión bien tomada. Comparar el resultado del desempeño de estos materiales con respecto a un material tan común y comercial como el ladrillo demuestra que existen alternativas que cumplen con las mismas funciones, pero tienen un impacto ambiental menor.

10. Mecanismos de compensación de CO2

En Colombia, existen varios mecanismos de compensación de CO2 disponibles para edificaciones que buscan reducir su impacto ambiental y contribuir a la mitigación del cambio climático. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), algunos de estos mecanismos incluyen la compensación voluntaria de carbono, las certificaciones ambientales, los bonos de carbono y los programas de reforestación y conservación (PNUD, s.f.).

10.1 Compensación voluntaria de carbono

La compensación voluntaria de carbono permite a las edificaciones calcular sus emisiones de CO2 y compensarlas mediante la inversión en proyectos de reducción de emisiones o de captura de carbono. Este mecanismo está respaldado por organizaciones como la Iniciativa de Compensación Voluntaria de Carbono (VCS, por sus siglas en inglés) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) establecido por el Protocolo de Kyoto (VCS, s.f.).

Existen varias iniciativas y programas en Colombia que facilitan las compensaciones voluntarias de carbono. Uno de los principales actores en este campo es la Bolsa de Valores de Colombia (BVC), que ha desarrollado un Mercado de Carbono para facilitar la compra y venta de créditos de carbono entre empresas y proyectos que generan reducciones verificables de emisiones (BVC, s.f.).

Además, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia ha establecido un marco regulatorio para promover las compensaciones voluntarias de carbono como parte de su estrategia nacional de cambio climático. Esto incluye la creación de un Registro Nacional de Reducciones de Emisiones (RENARE), donde se pueden registrar y verificar proyectos que generen reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

Otra entidad importante en el ámbito de las compensaciones de carbono en Colombia es la Fundación Natura, que desarrolla proyectos de reforestación y conservación de bosques para capturar CO₂ y contribuir a la mitigación del cambio climático. Estos proyectos ofrecen oportunidades para que las empresas y los individuos compensen sus emisiones de carbono invirtiendo en la protección y restauración de ecosistemas naturales (Fundación Natura, s.f.).

10.2 Certificaciones ambientales

Certificaciones como LEED y EDGE promueven prácticas de construcción sostenible que reducen las emisiones de CO₂ de los edificios. Estas certificaciones son otorgadas por entidades como el Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos (USGBC) y el Banco Mundial, respectivamente (USGBC, s.f.; Banco Mundial, s.f.).

La certificación EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) es un sistema desarrollado por el Banco Mundial que se centra en promover edificaciones sostenibles y eficientes en el uso de recursos en países en desarrollo (Banco Mundial, s.f.). Aunque EDGE no es específicamente parte del sistema LEED, comparten objetivos similares de promover la construcción sostenible y la reducción del impacto ambiental de los edificios.

En Colombia, la certificación EDGE ha ganado relevancia como una alternativa para promover la construcción de edificaciones más sostenibles y eficientes en el uso de recursos. EDGE se enfoca en tres aspectos principales: energía, agua y materiales, y proporciona un proceso de certificación que evalúa el desempeño de un edificio en estos ámbitos (EDGE, s.f.).

Para obtener la certificación EDGE en Colombia, un proyecto debe cumplir con ciertos criterios de eficiencia en el diseño y la construcción. Estos criterios están diseñados para garantizar que el edificio utilice menos energía, agua y materiales en comparación con un edificio convencional de referencia. Algunas de las estrategias comunes para lograr la certificación EDGE incluyen el uso de materiales de construcción reciclados o locales, la

instalación de sistemas eficientes de iluminación y HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), y la implementación de tecnologías para la captación y reutilización de agua.

La certificación EDGE ofrece beneficios tanto para los desarrolladores y propietarios de edificios como para la sociedad en general. Por un lado, los edificios certificados EDGE pueden disfrutar de ahorros significativos en costos operativos debido a la reducción en el consumo de energía y agua. Además, estas edificaciones suelen tener una huella ambiental más baja, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y la conservación de los recursos naturales.

10.3 Bonos de carbono

En Colombia, se están desarrollando mercados de bonos de carbono que permiten a las edificaciones compensar sus emisiones de CO₂ mediante la compra de créditos de carbono generados por proyectos certificados. Estos mercados están respaldados por entidades como la Bolsa de Valores de Colombia y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (BVC, s.f.; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

En Colombia, los bonos de carbono juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático y la promoción de prácticas sostenibles. Los bonos de carbono son unidades de medida que representan una tonelada métrica de dióxido de carbono (CO₂) equivalente que se ha reducido, evitado o capturado de la atmósfera como resultado de un proyecto de reducción de emisiones.

El mercado de bonos de carbono en Colombia está respaldado por diversas iniciativas y programas gubernamentales y privados. Una de las entidades clave en este ámbito es la Bolsa de Valores de Colombia (BVC), que ha establecido un Mercado de Carbono para facilitar la compra y venta de bonos de carbono entre proyectos que generan reducciones verificables de emisiones y empresas e inversores interesados en compensar sus emisiones de carbono (BVC, s.f.).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia también desempeña un papel importante en la promoción de los bonos de carbono como parte de su estrategia nacional de cambio climático. El Ministerio ha establecido un marco regulatorio para el registro y la verificación de proyectos de reducción de emisiones, así como un Registro Nacional de Reducciones de Emisiones (RENARE) donde se pueden registrar y certificar los bonos de carbono generados por estos proyectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

Además, existen varias organizaciones no gubernamentales y proyectos privados en Colombia que desarrollan proyectos de reducción de emisiones y generan bonos de carbono como resultado. Estos proyectos pueden incluir iniciativas de energías renovables, eficiencia energética, reforestación, captura y almacenamiento de carbono, entre otros (PNUD, s.f.).

10.4 Programas de reforestación y conservación

Diversas organizaciones y entidades gubernamentales en Colombia implementan programas de reforestación y conservación de bosques que permiten a las edificaciones compensar sus emisiones de CO₂ mediante la inversión en proyectos de restauración de ecosistemas naturales. Ejemplos incluyen programas como el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Fundación Natura (PNUD, s.f.; Fundación Natura, s.f.).

Los programas de reforestación y conservación en Colombia también sirven como un efectivo mecanismo de compensación de CO₂ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, s.f.). La reforestación implica el cultivo de árboles en áreas previamente deforestadas o degradadas, mientras que la conservación implica la protección y gestión sostenible de los bosques existentes (Parques Nacionales Naturales de Colombia, s.f.). Ambas prácticas contribuyen significativamente a la captura y almacenamiento de carbono atmosférico, lo que ayuda a mitigar el cambio climático.

Cuando los árboles crecen, absorben dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis y lo convierten en materia orgánica, como la madera y la biomasa. Este carbono se almacena en la biomasa de los árboles y en el suelo forestal, lo que significa que los bosques actúan como sumideros naturales de carbono.

Por lo tanto, al promover la reforestación y la conservación de los bosques, se está contribuyendo directamente a la captura y almacenamiento de CO₂ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, s.f.). Además, los proyectos de reforestación y conservación pueden generar bonos de carbono o créditos de carbono, que representan las reducciones verificadas de emisiones de CO₂ logradas por el proyecto (Fundación Natura, s.f.).

Estos bonos de carbono pueden ser comprados y utilizados por empresas, gobiernos y personas para compensar sus propias emisiones de CO₂, contribuyendo así a la neutralidad de carbono y al cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones.

11. Conclusiones

Según diseño general.

- El diseño con mejor desempeño fue el de envolvente en superboard, a pesar de que el material tuvo que ser traído desde Pereira, mientras que los demás materiales pudieron ser conseguidos dentro del Valle de Aburrá.
- En todos los diseños, la categoría de mayor impacto fue la estructura, representando entre un 69 y 72% de las emisiones totales, como se muestra en las figuras 15, 16 y 17.
- En todos los diseños, la categoría de menor impacto fue la envolvente, representando entre un 3 y 7% de las emisiones totales, como se muestra en las figuras 15, 16 y 17.
- En todos los diseños, la etapa del ciclo de vida de mayor impacto fue la A1-A3, en la extracción y creación de los materiales, representando siempre más del 90% de las emisiones totales.
- Todos los diseños tuvieron resultados bastante similares, encontrando pequeñas variaciones en las emisiones de los materiales de la envolvente.
- El diseño con envolvente en GRC tiene un desempeño bastante similar al de superboard, sin embargo, tuvo emisiones un 21% mayores, el grueso de esta diferencia se encuentra en la etapa del ciclo de vida B4-B5, que es la etapa de reemplazo y mantenimiento. Como se muestra en la figura 18, ambos diseños fueron preconcebidos bajo los mismos parámetros a lo largo de todo el ciclo de vida, a excepción del material en la envolvente, por lo cual no hay claridad en cuanto al origen de esta diferencia. Lo más probable es que sea alguna propiedad técnica del GRC que no tiene el superboard.
- El desempeño del habitáculo tuvo resultados más favorables porque el acero que fue utilizado para la estructura del mismo tenía un alto porcentaje de material reciclado (80% del acero reciclado). Si el origen del acero no fuese reciclado, los resultados del ACV podrían cambiar significativamente, por esto, hay que tener en cuenta que las combinaciones de materiales elegidas según las posibilidades de las bases de datos utilizadas pueden afectar las respuestas.

- Los diseñadores deben tener conocimiento sobre los marcos certificables y normativos de los materiales que existen, pues esto es una herramienta para tomar decisiones más conscientes y eficientes. Los fabricantes también deben tener conocimiento sobre estas certificaciones para que sus productos se vuelvan más competitivos en un mercado en donde cada vez importa más la eficiencia, la sostenibilidad y las buenas prácticas.

Según materiales de la envolvente

- El superboard tuvo el mejor desempeño ambiental, emitiendo 117 kg de CO₂eq. El GRC emitió un 16% (136 kg) más y el ladrillo con mortero un 94% (227) más.
- A pesar de que una envolvente en ladrillo representa casi el doble de las emisiones de una envolvente en superboard, el impacto que tiene el material a nivel global no representa un aumento demasiado mayor de las emisiones totales.

Según metodología

- Los ACVs realizados fueron análisis preliminares de un diseño también preliminar. Varios elementos, categorías y etapas se obviaron ya fuese por falta de información sobre materiales en las bases de datos disponibles, futuros usos de la edificación pues el proyecto apenas se está constituyendo, o por desconocimiento del tema, pues este es un ejercicio académico de aprendizaje, que también buscaba analizar que tipo de acercamiento podría tener un estudiante de arquitectura a esta temática de análisis de ciclo de vida.
- El alcance inicial que se buscaba tener tuvo que ser acotado varias veces durante la duración de la producción de esta monografía, dando a entender su complejidad.
- La herramienta utilizada, One click LCA, es una herramienta que vale la pena seguir explorando pues es bastante intuitiva y fácil de usar. Es una herramienta de pago, pero ofrece una licencia estudiantil gratuita y tiene un catálogo de cursos también gratuitos que permiten aprenderla a usar correctamente.
- La herramienta One Click LCA, al estar enfocada en la industria de la construcción, a diferencia de otras herramientas que se pensaban utilizar

inicialmente como open LCA, permite vincular el ACV a la metodología BIM, permitiendo extraer datos de modelos 3D creados en herramientas como REVIT, lo cual amplía significativamente las posibilidades de utilizar el ACV como una herramienta para la toma de decisiones conscientes de un proyecto en su etapa de diseño, y logrando pronosticar los impactos que puede tener el mismo.

- Tener un acercamiento a este tipo de conocimiento es fundamental para todos los arquitectos, pues en pleno siglo 21, el diseño debe ir mucho más allá de la forma y la función, y la capacidad de medir los impactos reales de las cosas antes de que sean construidas y tomar decisiones inteligentes basadas en esos resultados será determinante en la guerra contra el cambio climático y el calentamiento global.

Referencias

Benoît, C., Mazijn, B., & Reenaas, M. (2010). The application of life cycle sustainability assessment in the European context: An introduction. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(10), 997-1001.

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Calidad en la vivienda de interés social* / Díaz Reyes, Carlos Alberto; Ramírez Luna, Julia Aurora (Eds.), Aincol (textos). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2011. 61

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social* / Díaz Reyes, Carlos Alberto; Ramírez Luna, Julia Aurora (Eds.), Aincol (textos) .-- Bogotá, D.C. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011. 47 p. (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social; no.: 2)

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Las normas aplicables en el desarrollo de vivienda de interés social* / Díaz Reyes, Carlos Alberto; Ramírez Luna, Julia Aurora (Eds.), Aincol (textos). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2011. 48 p. (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, No. 3)

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Las normas aplicables en el desarrollo de vivienda de interés social* / Díaz Reyes, Carlos Alberto; Ramírez Luna, Julia Aurora (Eds.), Aincol (textos). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2011. 76 p. (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, No. 4)

Di Ruocco, G., & Gaita, A. (2023). Life Cycle Assessment from Cradle-to-Handover Approach to Greenhouse Gas Emissions Mitigation: Carbon Storage in Timber Buildings. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071722>

Ecodiseño: Ingeniería Del Ciclo de Vida Para El Desarrollo de Productos Sostenibles (2004).

Intromac. (2019). *GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE*. www.intromac.com

Ortiz, O., Pasqualino, J. C., & Castells, F. (2010). Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Management*, 30(4), 646–654. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.11.013>

Paulsen, J. S., & Sposto, R. M. (2013). A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE.” *Energy and Buildings*, 57, 95–102. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.11.014>

Pinto, J. K., & Slevin, D. P. (1987). Critical success factors across the project life cycle. *Project Management Journal*, 18(3), 67–75.

Restrepo-Montoya, A. (2020). Hogar Concreto La industrialización de la vivienda y el hábitat sostenible. In *Universidad Pontificia Bolivariana, Technische Universitat Munchen*.

Rivero-Camacho, C., Martín-del-Río, J. J., & Marrero-Meléndez, M. (2023). Evolution of the life cycle of residential buildings in Andalusia: Economic and environmental evaluation of their direct and indirect impacts. *Sustainable Cities and Society*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104507>

Sala, S., Farioli, F., & Masoni, P. (2018). Life cycle sustainability assessment in the construction sector. *A Review. Sustainability*, 10(2), 525.

Sostenibilidad | UPB. (n.d.). Retrieved November 1, 2023, from <https://www.upb.edu.co/es/sostenibilidad>

IPCC. (2014). Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

GHG Protocol. (2004). Directrices del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero.

WRI. (2021). GHG Protocol. <https://www.ghgprotocol.org/>

Delmas, M. A., & Blass, V. D. (2010). Measuring corporate environmental performance: The trade-offs of sustainability ratings. *Ecological Economics*, 70(2), 190-200.

BVC. (s.f.). Mercado de Carbono. Bolsa de Valores de Colombia. Recuperado de https://www.bvc.com.co/?tab=indices_accionarios&tabNoticias=comunicados-de-prensa

Banco Mundial. (s.f.). EDGE: Excelencia en el Diseño para Mayores Eficiencias. Recuperado de <https://edgebuildings.com/edge-excellence-in-design-for-greater-efficiencies-es/?lang=es>

Fundación Natura. (s.f.). Programas de conservación. Recuperado de <https://natura.org.co/que-hacemos/tematicas/conservacion-y-restauracion-de-la-biodiversidad/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). Bonos de Carbono. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/impuesto-al-carbono/>

PNUD. (s.f.). Desarrollo Sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

USGBC. (s.f.). LEED: Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental. Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos. Recuperado de <https://www.usgbc.org/leed>

VCS. (s.f.). ¿Qué es la certificación VCS? Recuperado de <https://www.aenor.com/certificacion/medio-ambiente/proyectos-vcs>

