



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía



EVALUACIÓN COMPARATIVA PARA REDUCIR EL GLOBAL WARMING POTENTIAL – GWP EN LA ETAPA DE PRODUCTO (A1 – A3) DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO CONVENCIONAL Y UNA ALTERNATIVA HÍBRIDA EQUIVALENTE EN MADERA MASIVA, LOCALIZADO EN LA CIUDAD DE LIMA – PERÚ

POR:

Carbajal Dominguez, Esther Lucia

Trabajo Integrativo presentado a la Facultad de Ingeniería & Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción para optar al grado académico de **Magíster en Construcción Industrializada en Madera**

Profesor Guía: Lara San Martín, Alejandro José

Profesor Co-Guía: Pérez Fernández, Nicolás

Marzo de 2025
Concepción, Chile



Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

© 2025 Carbajal Dominguez, Esther Lucia

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mi padre, por sembrar en mi la búsqueda del conocimiento;
a mi madre, por mostrarme esta materialidad conectada a la historia familiar;
y a todos mis profesores, quienes me enseñaron el valor de la madera
y a ser una mejor profesional.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

ÍNDICE

Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Marco conceptual	4
2. Propuesta de investigación	5
2.1. Caso de estudio	5
2.2. Preguntas de investigación	9
2.3. Objetivos	9
2.4. Diseño metodológico	9
3. Resultados	15
3.1. Primer objetivo específico	15
3.2. Segundo objetivo específico	18
4. Discusión de resultados	24
4.1. Resultados de estudios similares	24
4.2. Resultados y contraste del presente estudio	25
4.3. Limitaciones del estudio	26
5. Conclusiones	27
6. Glosario	28
7. Referencias bibliográficas	30
8. Anexos	33

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Resumen

El presente estudio se centra en el análisis de ciclo de vida – ACV de un edificio residencial típico de la ciudad de Lima (3 sótanos, 9 pisos más azotea), donde se evaluó el carbono incorporado (etapa de producto: A1 – A3) de un edificio convencional en hormigón armado -erC(HA)- y se comparó a una propuesta híbrida en hormigón armado y madera masiva -erH(HA+CLT)-, la categoría de impacto evaluada fue: potencial de calentamiento global (PCG). Los resultados de las dos modelaciones mostraron que el edificio híbrido impacta con una menor huella de carbono; para el escenario 1 donde no se considera el almacenamiento de carbono biogénico, se redujo en un 24.87%, con 176.37 kgCO₂e/m² de superficie, y para el escenario 2, donde si se considera el biocarbón, se redujo aún más en un 138.86%, con -91.23 kgCO₂e/m²; en comparación con el indicador que resulta del edificio convencional, con 234.75 kgCO₂e/m². Los resultados muestran que integrar elementos constructivos en madera masiva es beneficioso para el medio ambiente.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida – ACV, etapa de producto A1 – A3, carbono incorporado, carbono biogénico, edificio residencial típico de la ciudad de Lima.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Abstract

This study focuses on the life cycle analysis - LCA of a typical residential building in the city of Lima (3 basement, 9 floors plus roof terrace), where the embodied carbon (product stage: A1 - A3) of a conventional reinforced concrete building -erC (HA)- was evaluated and compared to a hybrid proposal in reinforced concrete and mass timber -erH (HA+CLT)-, the impact category evaluated was: global warming potential (GWP). The results of the two models showed that the hybrid building impacts with a lower carbon footprint; for scenario 1 where biogenic carbon storage is not considered, it was reduced by 24.87%, with 176.37 kgCO₂e/m² of surface, and for scenario 2, where biochar is considered, it was further reduced by 138.86%, with -91.23 kgCO₂e/m²; compared to the indicator resulting from the conventional building, with 234.75 kgCO₂e/m². The results show that integrating construction elements in solid wood is beneficial for the environment.

Keywords: Life Cycle Assessment – LCA, product stage A1 – A3, embodied carbon, biogenic carbon, typical residential building in the city of Lima.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

1. Introducción

Este estudio se centra en la ciudad de Lima, capital nacional principal del Perú; como metrópoli debe su crecimiento poblacional, principalmente, a la migración de diferentes partes del país. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima en su aniversario del presente año 2025, cuenta con una población de 10 432 133 habitantes.

En el contexto actual, el crecimiento poblacional de Lima presenta demandas urgentes dentro del ámbito de la vivienda. Según un estudio realizado en el 2024 por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento – MVCS, para el 2046, habrá una brecha de medio millón de hogares, representando un incremento del 21% con respecto al último Censo del año 2017.

Existe una demanda insatisfecha de viviendas en toda la capital. La Cámara Peruana de la Construcción – Capeco, sostiene que existe un interés de los demandantes de vivienda por vivir en departamentos, por esta razón los edificios residenciales que se ofertan en Lima Metropolitana son cada vez más altos, predominando la demanda de edificios residenciales de 6 a 10 pisos con un 43.9%; resultando de gran importancia la generación de más estudios sobre el impacto ambiental que genera una edificación residencial convencional y otras opciones de menor impacto para el medio ambiente.

Las edificaciones como parte del entorno construido generan una gran huella de carbono, debido a que el sector de construcción sigue liderando en la contribución de CO₂, para el 2023 emitió a nivel mundial un 34% de GEI (Gases de Efecto Invernadero) (UNEP, 2025). Según el informe de “Emisiones de GEI de todos los países del mundo” del 2024, Perú emitió 94.05 Mt CO₂e (Dióxido de Carbono Equivalente), siendo el conjunto de sectores evaluados (industria energética, transporte, industria del combustible, edificios, procesos, exploración de combustible, agricultura y desperdicios) los que se relaciona al ciclo de vida de una edificación.

En el desarrollo de esta investigación se va a cuantificar las emisiones de carbono de un edificio residencial convencional típico de la ciudad de Lima, lo que servirá de base para hacer una comparación con un edificio equivalente, pero con una estructura primaria que emplee madera masiva (Cross Laminated Timber – CLT). El planteamiento se realiza con el fin de responder a las políticas de mitigación y adaptación basada en planificación territorial y desarrollo neutro en carbono, según los lineamientos estipulados en la Ley Marco sobre Cambio Climático de Perú.

Así mismo, el estudio pretende ser un punto de partida para que el sector construcción evalúe nuevas alternativas de edificios residenciales con bajas emisiones de carbono, y sean el faro para alcanzar la meta climática en reducción de emisiones de GEI para el 2030; y, se logre alcanza el compromiso de carbono neutralidad para la mitad del presente siglo.

El estudio se realizará mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida – ACV (Life Cycle Assessment – LCA), utilizada para evaluar el impacto ambiental, en la categoría de Potencial de Calentamiento Global – PCG (Global Warming Potential – GWP), del edificio residencial convencional y su equivalente, en la etapa de producto (A1: extracción de materia prima, A2: transporte de materia prima y A3: manufactura de materiales de construcción), del ciclo de vida de una edificación.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

1.1. Marco conceptual

Los materiales renovables de origen biológico, como la madera, ofrecen soluciones viables que permiten capturar carbono y reducir el impacto ambiental, pero plantean desafíos relacionados con la conservación de la biodiversidad, el uso del suelo y la gestión forestal sostenible (Zechmeister, 2025).

Por lo que el CLT, como material estructural de construcción de base biológica, cobra relevancia para enfrentar los efectos del cambio climático. Además, debido a la creciente popularidad de los edificios de madera contralaminada, varios estudios están evaluando los impactos ambientales de los edificios residenciales que utilizan ese material (Quintana – Gallardo et al., referencia a Jayalath et al., 2021), mediante la metodología de ACV. Estos estudios están demostrando que sustituir materiales de construcción convencional por madera masiva conduce a una reducción de las emisiones de CO₂ (Himes y Busby, 2020). En ese sentido, los resultados proporcionan evidencia sólida y transparente sobre las métricas de rendimiento ambiental para edificios de CLT u otras maderas masivas (Liang et al., 2020).

Estas nuevas propuestas de materiales constructivos (madera masiva) con baja huella de carbono, ayudan a alcanzar planes de acción climática. El fin del sector residencial es lograr descarbonizarse, reduciendo las emisiones de carbono incorporado y carbono operativo (O Hegarty y Kinnane, 2023). La presente investigación se centra en evaluar sólo el carbono incorporado. El cuál es el Potencial de Calentamiento Global (GWP) total del edificio en estudio, asociado a las emisiones de carbono desde la cuna hasta la puerta de toda la fabricación de materiales de construcción (Dolezal et al., 2021). Los resultados que se obtendrán se van a presentar en GWP fósil y GWP biocarbón, la diferencia radica en la consideración del carbono biogénico.

Entendiendo por carbono biogénico a las emisiones de CO₂ que se originan de fuentes biológicas como plantas, árboles y suelos (Liang, referencia a Harris et al, 2020). También, como el carbono que se extrae de la atmósfera durante el crecimiento de la biomasa y se libera posteriormente a la atmósfera debido a la combustión y descomposición de la biomasa (Stamford, 2020). De esta forma, un mayor uso de madera y materiales de base biológica contribuyen a la conservación de recursos y protección del clima; además, al almacenar el carbono sirven de depósitos temporales de carbono, lo que da tiempo para seguir desarrollando tecnologías eficaces para capturar y secuestrar permanentemente el carbono biogénico contenido en las edificaciones (Churkina et al., 2020).

Para el estudio se va a considerar dos escenarios de resultado: método 0/0 (Escenario 1 – Fósil), el cual no considera la fijación del carbono biogénico; y el método -1/+1 (Escenario 2 – Biocarbón), el cual consiste en la fijación del carbono biogénico en la etapa de producto y su liberación al final de su vida útil independientemente de la forma de eliminación (reciclaje, incineración o vertedero) (Oullet, 2023).

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

2. Propuesta de investigación

2.1. Caso de estudio

2.1.1. Modelo base: Edificio residencial convencional en hormigón armado – erC (HA)

El edificio seleccionado para el estudio es una edificación residencial, de densidad y altura media, típica de la ciudad Lima – Perú y específicamente del conjunto de distritos enmarcados en la denominada Lima Top (Barranco, La Molina, Miraflores, San Borja, San Isidro y Surco). La edificación reúne características generales, de área de departamentos, cantidad de ambientes, servicios adicionales y altura de edificación, demandadas por individuos o familias según la Cámara Peruana de la Construcción – Capeco.

Figura 1
Ubicación del edificio residencial – Miraflores, Lima – Perú.



Nota. Localización del edificio estudiado (modelo base) en el distrito de Miraflores de la ciudad de Lima. Tomado del uso de la aplicación Google Eart, 2024.

2.1.1.1. Aspectos generales

El predio donde se desarrolla la edificación cuenta con un área de 1025.00m² y el proyecto residencial se proyecta en 9417.06m² de área techada.

Figura 2
Áreas del edificio residencial.



Nota. Tomado de la Memoria Descriptiva del proyecto, 2024.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

El inmueble está compuesto por una edificación de dos frentes de 09 pisos más azotea. El edificio alberga 82 departamentos en total (76 flats y 6 dúplex) de 1, 2 y 3 dormitorios. El proyecto presenta 3 sótanos destinados a 84 estacionamientos vehiculares para vivienda, y 119 estacionamientos de bicicletas también para vivienda. En el último sótano se desarrolla el cuarto de bombas con cisternas para uso común y contra incendios. Además, se desarrolla el cuarto de bombas y cisternas para el sistema de planta de tratamiento de aguas grises.

2.1.1.2. Estructura

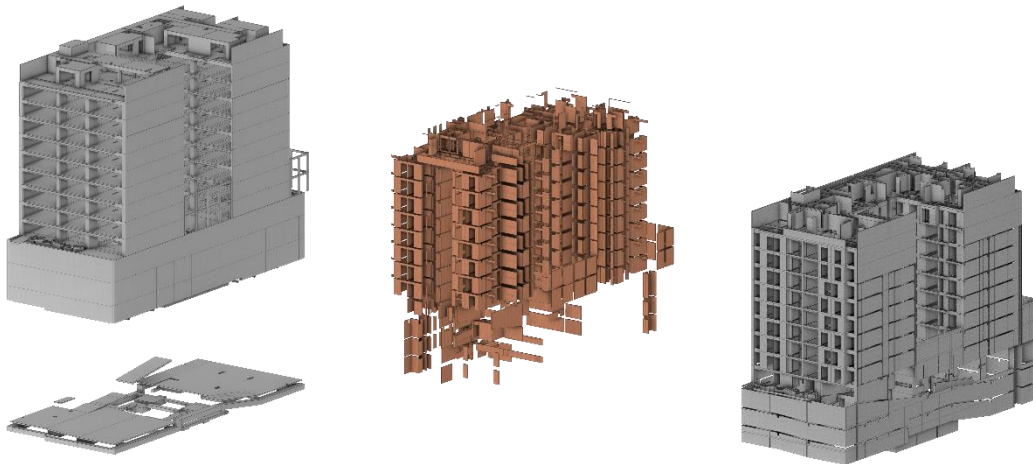
El edificio convencional está conformado por la cimentación (zapatas aisladas, cimientos corridos, losas y vigas), la estructura portante de cargas verticales y sísmicas (muros de corte, placas y columnas de concreto armado de 35, 30, 25, 20 y 18cm) y por vigas y losas (prelomas aligeradas en una y dos direcciones, y prelomas macizas en dos direcciones, con 15, 20 y 25cm de espesor) en concreto armado.

2.1.1.3. Arquitectura

Para el estudio, se estará considerando: la envolvente (muros perimetrales), la compartimentación (muros y tabiques interiores en ladrillos de sílico calcáreo: P – 07 SC, P – 10 SC, P – 12 SC, P – 14 SC y corta fuego), así como un preacabado de tarrajeo (revoque) de muros exteriores, interiores, placas, columnas y cerco perimétrico a base de mortero de cemento ($e=1.5\text{cm}$).

Figura 3

Estructura primaria y secundaria del edificio residencial convencional en hormigón armado.



Nota. Modelado en el software Revit e importado a Cadwork. Elaborado por L. Carbajal, 2024.

Para una evaluación comparativa equivalente, se simplifica los elementos arquitectónicos del edificio base, no tomando en cuenta las terminaciones de piso en cemento pulido, tarrajeo de techos y los acabados de pintura en paredes y techos y el revestimiento de paredes. Analizando lo que se denomina casco del edificio, resultando la suma de la estructura y en arquitectura de los muros y el tarrajeo (revoque).

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

2.1.2. **Modelo equivalente: Edificio residencial híbrido (hormigón armado y madera masiva) – erH (HA+CLT)**

A partir de la línea base, se busca proponer una edificación equivalente (casco) que reduzca las emisiones de carbono en la etapa a analizar del ciclo de vida de la edificación (etapa de producto: A1 – A3); por lo que se propone cambiar los muros y las losas por madera contralaminada (Cross Laminated Timber – CLT). Asimismo, se propone una estructura de protección, que no exponga directamente las fachadas de CLT al medio ambiente; además, se protege la estructura de CLT del contacto directo con la superficie del suelo, manteniendo el primer nivel en sistema constructivo convencional de hormigón armado. Por razones estructurales y para situaciones de evacuación se mantiene los núcleos verticales de circulación (escalera de emergencia y ascensor) en concreto armado; así como también, la subestructura (cimentación, cisterna, 3 sótanos).

Figura 4

Estructura primaria y secundaria del edificio residencial híbrido en hormigón armado y madera masiva.



Nota. Modelado en el software Cadwork. Elaborado por L. Carbajal, 2024.

Para los muros perimetrales de fachada se ha propuesto un CLT de 130mm (5 capas), y la estructura que le brinda protección está compuesta por rastreles verticales de 2"x1" de madera blanda, un tyvek de 0.2mm y una placa de yeso cartón de 15mm resistente la humedad y que cuenta con una malla de fibra de vidrio. Para los muros perimetrales medianeros (los que limitan con los predios colindantes) y los muros divisorios entre unidades inmobiliarias – U.I. y áreas comunes también se ha propuesto un CLT de 130mm. En cambio, para tabiques divisorios dentro de las U.I. se planteó un CLT de 90mm (3 capas), debido a que algunos son estructurales. Para las losas de techo se ha propuesto un CLT de 160mm (5 capas) y un vaciado de hormigón liviano de 50mm de espesor.

Para facilitar la comparación, se ha supuesto que ambos modelos (base y equivalente) cuenten con la misma estructura general (trazos generales, áreas de departamentos y alturas entre pisos) y sólo exista mínimas variaciones por el empleo de sistemas constructivos diferentes.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Figura 5
Distinción de tipo de elemento constructivo.



1 Muro perimetral de fachada 161.2mm

- A CLT 130mm
- B Madera blanda 1"x2" (rastrel) 17mm
- C Tyvex 0.2mm
- D Volcoglass 15mm



2 Muro perimetral medianero 130mm

- E CLT 130mm



3 Muro interior divisorio entre U.I. y áreas comunes 130mm

- F CLT 130mm



4 Muro interior de tabiquería 90mm

- G CLT 90mm



5 Losa de piso 210mm

- H CLT 160mm
- I Hormigón liviano 50mm



Nota. Modelado en el software Cadwork. Adaptado por L. Carbajal, 2024.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

2.2. Preguntas de investigación

¿Cuánto se reduce las emisiones de carbono de un edificio residencial típico de la ciudad de Lima, al cambiar los elementos de su estructura primaria y secundaria por madera masiva?

2.2.1. *Hipótesis*

Las emisiones de carbono incorporado de los materiales de construcción de un edificio residencial típico de la ciudad de Lima, disminuirán en un 50%, cuando se cambia la estructura primaria (columnas, vigas y losas) por madera masiva, así como también la secundaria (muros divisorios, tabiquerías, y el revoque) por una estructura de protección contra el medio ambiente.

2.3. Objetivos

2.3.1. *O. General*

Comparar un mismo modelo de edificio residencial típico de la ciudad de Lima, en sistema constructivo convencional de hormigón armado (casco) contra una propuesta con variaciones en su estructura primaria y secundaria empleando madera masiva, para cuantificar las emisiones de carbono incorporado de la etapa de producto (A1 extracción de materia prima, A2 transporte y A3 fabricación) del ciclo de vida de la edificación, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida – ACV.

2.3.2. *O. Específicos*

- Desarrollar una comparativa volumétrica de los materiales del modelo convencional en hormigón armado, contra la propuesta híbrida en hormigón armado y madera masiva.
- Determinar si en una edificación en altura híbrida de hormigón y madera masiva, se logra una reducción significativa del CO₂e incorporado, cuando se compara con una edificación convencional de hormigón armado.

2.4. Diseño metodológico

2.4.1. *Análisis de ciclo de vida – ACV*

Según la definición de la norma técnica ISO 14040, el ACV es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida (2006).

Aplicado a edificios, el ACV busca evaluar las cargas ambientales desde un punto de vista completo (desde la extracción de materiales hasta el término de su vida útil, pasando por la

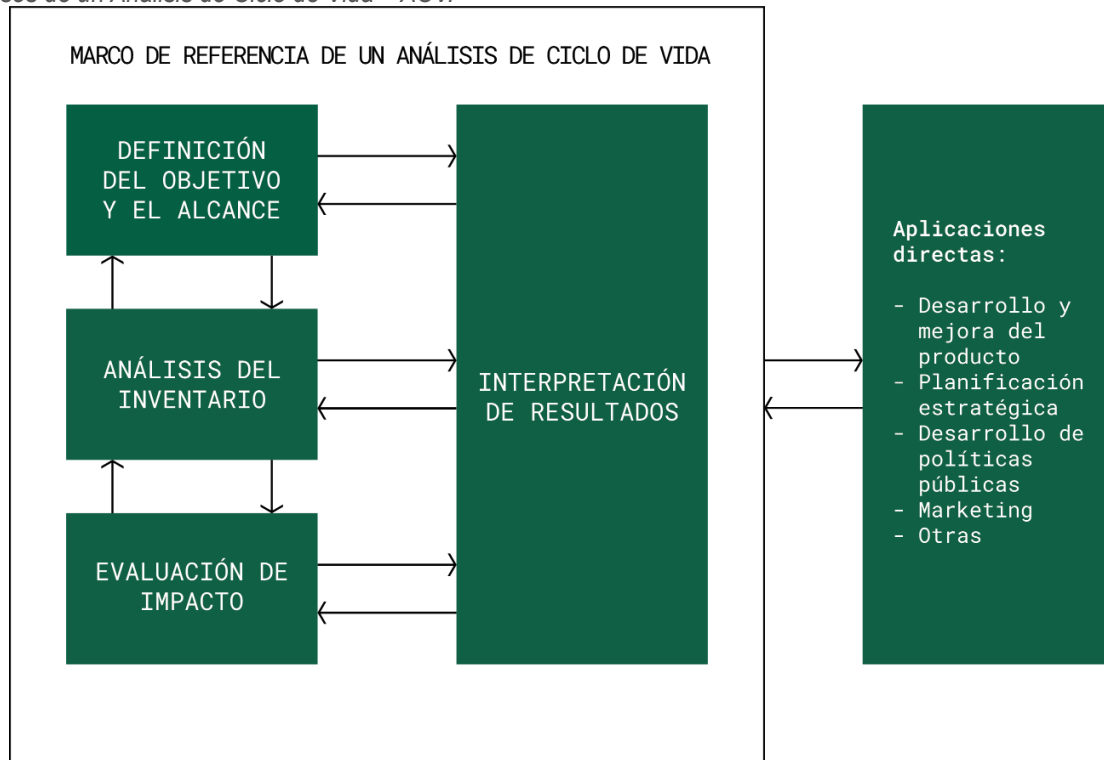
Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

manufactura de materiales, la construcción del edificio y el uso); siendo la cadena de suministro sumamente compleja e involucra miles de procesos, cada uno de estos procesos requiere inputs (insumos) del el medio ambiente, lo que a su vez generan outputs (productos resultantes de un proceso de producción) hacia el mismo medio ambiente (Bunster, 2021).

La ISO 14044 nos señala que el estudio de ACV está compuesto por cuatro fases, como se aprecia en la Figura 6.

- i. La definición del objetivo y el alcance,
- ii. El análisis del inventario,
- iii. La evaluación del impacto, y
- iv. La interpretación.

Figura 6
Fases de un Análisis de Ciclo de Vida – ACV.



Nota. Tomado de la Norma Técnica colombiana NTC – ISO 14040, 2007.

2.4.1.1. Fase 1: Definición del objetivo y el alcance

2.4.1.1.1. Límites del sistema

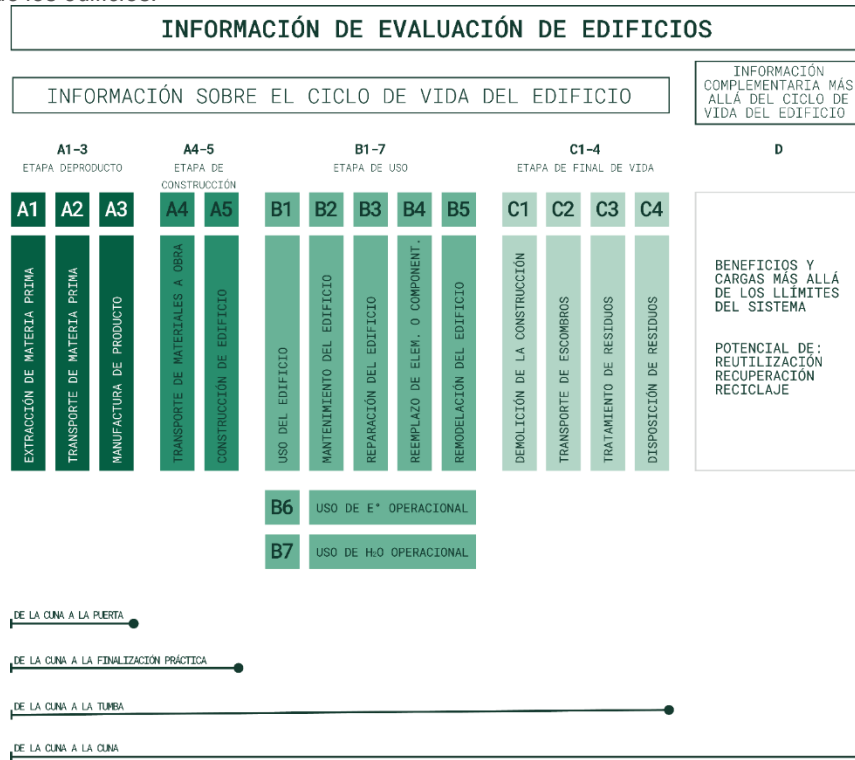
Para la evaluación del ciclo de vida de la edificación (modelo base y modelo equivalente), sólo se evaluará la etapa de producto (A1 extracción de materia prima, A2 transporte de materia prima y A3 manufactura de materiales de construcción), conocido como “de la cuna a la puerta” (ver Figura 7), debido a que sólo se está analizando materiales de construcción.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Como no se evalúa la etapa de construcción, no se tiene en consideración en transponde de los materiales obtenidos en diferentes partes de la región o el mundo.

Según Felmer y otros autores, la etapa de producto incluye todo proceso para extraer las materias primas del medio ambiente, transportarlas hasta la fábrica y convertir en productos de construcción listos para usar (2022).

Figura 7
Ciclo de vida de los edificios.



Nota. Etapas del ciclo de vida de un edificio. Tomado de la página de One Click LCA, 2025.

2.4.1.1.2. Unidad funcional

Para el estudio la categoría de impacto a evaluar es el Potencial de Calentamiento Global – PCG (Global Warming Potential – GWP) y su unidad funcional es el metro cuadrado (m²) de superficie construida, y su unidad asociada es kgCO₂e/m² (Hernández y Méndez, 2024).

2.4.1.2. Fase 2: Análisis de inventario

El análisis de inventario implica la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema de producto (ISO 14040, 2007).

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

2.4.1.2.1. Cuantificación del material

En la primera parte de la fase 2, se cuantifica la cantidad de todos los materiales de construcción analizados que conforman el modelo base: edificio convencional de hormigón armado, y el modelo equivalente: edificio híbrido de hormigón armado y madera masiva. Para obtener las listas de materiales de cada modelo con sus respectivas cantidades; se trabajó sobre modelos digitales. Para evitar manejar resultados distintos obtenidos de softwares diferentes, se trabajaron ambos modelos en un mismo software (Cadwork).

El modelo base, llegó completo de primera fuente, modelado en el software Revit; así como también, en planimetrías en AutoCAD. Se exportó en formato IFC al Cadwork, y desde ahí se trabajó la generación de listas de materiales. Antes se tuvo que ordenar los elementos constructivos en grupos y subgrupos, para facilitar un mismo tipo de resultados para ambos modelos.

El modelo equivalente (hormigón armado y madera masiva) se modeló en el mismo software Cadwork, programa especializado en el diseño de estructuras en madera, lo cual agilizó el modelado. De igual forma al modelo convencional, se ordenó los elementos constructivos en grupos y subgrupos.

Las listas de materiales de ambos modelos fueron exportadas en formato Excel, y en este programa fueron reorganizadas por elemento constructivo, nivel de piso y material constructivo, finalmente obteniendo las cuantificaciones globales.

2.4.1.2.2. Coeficiente incorporado del material

El dato de los coeficientes incorporados de los materiales de construcción utilizados en ambos modelos, se extrajo de un resumen de la base de datos abierta y gratuita de la herramienta Planetary One Click LCA. Estos coeficientes incorporados, corresponden a la categoría de impacto y a la etapa de producto a evaluar en el presente estudio.

Los resúmenes de las Declaraciones Ambientales de Producto – DAP, sugeridas por la misma herramienta para Perú (ubicación geográfica a evaluar), vienen a ser datos genéricos locales, específicos de un fabricante local, específicos de fabricantes regionales o específicos del fabricante. En la Tabla 3 presentada en la parte de Resultados, se presenta el enlistado de los materiales de construcción utilizados y analizados. Según indicaciones específicas del cuadro resumen de la herramienta, estos datos han sido verificados por un tercero o por una parte independiente de acuerdo a los requisitos de la norma ISO 14025 o también han sido verificados internamente por el mismo One Click LCA.

Materiales de construcción seleccionados para la ubicación geográfica (Lima – Perú)

Figura 8
Materiales de construcción evaluados.



Nota. Elaboración por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Para el caso del CLT se eligió un material genérico, de madera blanda ($\rho=481 \text{ kg/m}^3$ – CH=12%) y procedencia local (Perú), y según el resumen de la DAP la composición del CLT se basa en la producción en las instalaciones de fabricación de Columbia Británica, Canadá y para el consumo de electricidad se utilizó datos de OCLCA para la electricidad promedio mundial. Para el caso de los rastreles se empleó una madera de coníferas blanda cepillado secado al horno ($\rho=440 \text{ kg/m}^3$ – CH=10%), y de la misma forma que el CLT, el insumo de energía de fabricación es un promedio mundial.

Para el hormigón premezclado se utiliza una base de datos específica de un fabricante local (Unión de Concreteras S.A. – UNICON). El mortero de cemento se ha seleccionado un fabricante regional (Brasil). Estos dos materiales mencionados, están cubiertos por una DAP y han sido verificados por terceros según la ISO 14025. En cambio, el hormigón liviano ha sido tomado de un dato genérico local, este producto de referencia es un hormigón celular ligero premezclado con EPS para árido con clase de resistencia 1 MPa y densidad 300 kg/m^3 , este último solo ha sido verificado internamente por One Click LCA.

Para el ladrillo se ha optado por un material genérico local, el cual sólo ha sido verificado internamente (por One Click LCA), pero no por un experto independiente. Pero de todos los materiales disponibles en la herramienta Planetary, es el material más similar al tipo de mampostería empleado en Perú.

Para la placa de yeso se ha elegido uno de procedencia mexicana (fabricante X – teriem), es una placa sintética no combustible formulada para resistir la humedad y está recubierta por una lámina de fibra de vidrio para soportar las condiciones climáticas. Para la membrana de barrera de vapor, se ha seleccionado el único disponible en la base de datos, es de origen danés (DAFA A/S), es una barrera de vapor difusible, hermética y con capacidad de adaptación a la humedad. Tanto la placa de yeso como la membrana han sido verificadas por terceros.

Como sólo se está analizando materiales de construcción (manufactura de materiales), y no la construcción de los modelos propiamente dicho; no entra en evaluación, en la etapa de producto, el módulo de transporte de materiales (A4) al sitio de construcción (de la puerta a la puerta). Por lo que, no se está tomando en cuenta las distancias de los materiales de construcción que se encuentran fuera de Perú, así como tampoco las distancias de las fábricas locales a la obra.

2.4.1.3. Fase 3: Evaluación de impacto

La ISO 14040 señala que la fase de evaluación de impacto tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario. Implicando la asociación de los datos de inventario con la categoría de impacto ambiental y con los indicadores de esta categoría (2007).

La norma también nos señala que se debe detallar los métodos, las suposiciones y otras decisiones que se han tomado en cuenta. Transparentando los procedimientos y la utilización de valores para una revisión crítica.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

2.4.1.3.1. Carga incorporada

El doctor Víctor Bunster, arquitecto especialista en ACV aplicado a edificaciones, plantea una metodología simplificada de ACV para calcular la carga incorporada inicial total (2021), mediante la siguiente fórmula:

$$CIIT = \sum_{m=1}^M (Q_m \times W_m \times E_m)$$

Donde:

CIIT: Carga incorporada inicial total

Q_m: Cantidad de material m

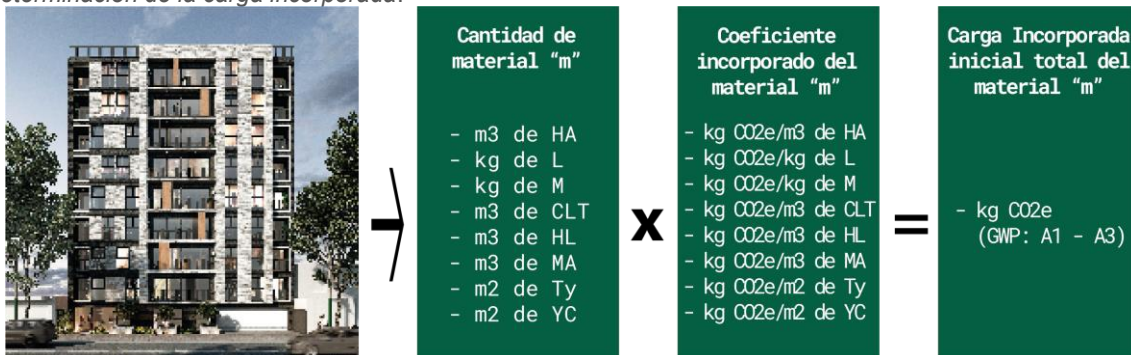
W_m: Coeficiente de desperdicio del material m

E_m: Coeficiente incorporado del material m

La CIIT de cada material, resulta de multiplicar la cantidad de un material determinado, por el coeficiente de desperdicio de dicho material y por el coeficiente de carbono incorporado del material a analizar. La sumatoria de las cargas incorporadas de cada material resulta el impacto de cada modelo de edificación.

Se señala que este método simplifica la modelación para obtener el valor de la CIIT, tomando la bases de datos y centrándose en cálculos aproximados, que permiten sacar resultados para comparar, sin la necesidad de investigar a detalle cada material.

Figura 9
Determinación de la carga incorporada.



Nota. Resumen de cálculo para hallar el CIIT. Recuperado y adaptado de "Anales de Edificación. Análisis de Ciclo de Vida en viviendas: un caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social", 2024.

2.4.1.4. Fase 4: Interpretación de resultados

En esta fase, la norma técnica ISO 14040 (2007); considera juntos, el análisis de inventario y la evaluación de impacto, para proporcionar resultados coherentes con el objetivo, el alcance, las limitaciones y las conclusiones, para quienes toman decisiones (desarrolladores de productos, desarrolladores de políticas públicas, áreas de marketing, etc.). Esta fase será abordada en los puntos (3 – Resultados), (4 – Discusión de resultados) y (5 – Conclusiones) de la presente investigación.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

3. Resultados

3.1. Primer objetivo específico

Desarrollar una comparativa volumétrica de los materiales del modelo convencional en hormigón armado, contra la propuesta híbrida en hormigón armado y madera masiva.

3.1.1. Fase 2: Análisis de inventario

3.1.1.1. Cuantificación de materiales

De la lista de materiales, se obtiene los volúmenes de materiales para cada modelo de edificio residencial a comparar. En la Tabla 1, se aprecia una diferencia volumétrica de 664.61 m³, siendo el edificio convencional el que tiene mayor volumen, puesto que su estructura la conforman diferentes espesores de losa y alturas de vigas, a diferencia del edificio híbrido que está conformado por una losa de CLT más hormigón liviano, todo a un solo espesor.

Tabla 1

Volumen de material por tipo de edificación residencial.

Material	MODELO	
	Base – erC (HA)	Propuesto – erH (HA+CLT)
	Volumen (m ³)	
Hormigón premezclado – HA	5415.91	2948.05
Ladrillo sílico calcáreo – L	1196.23	317.30
Mortero de cemento – M	670.30	295.77
CLT r=481 kg/m ³	0.00	2619.12
Hormigón liviano – HL	0.00	412.15
Madera blanda (rastrel) – MA	0.00	0.63
Tyvex – Ty	0.00	0.33
Yeso cartón resistente a la humedad – YC	0.00	24.48
Volumen Total	7282.44	6617.83

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

También se realiza una diferencia volumétrica entre la estructura primaria y la estructura secundaria del erC(HA) y del erH(HA+CLT), (revisar Tabla 2). De la diferencia se obtiene que el erC tiene 389.33m³ más que el erH cuando se compara sólo la estructura primaria. En cuanto a la estructura secundaria hay una diferencia de 275.28m³ también a favor del erC.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Tabla 2
Volumen de cada tipo de estructura por tipo de edificación residencial.

Material	MODELO	
	Base – erC (HA)	Propuesto – erH (HA+CLT)
	Volumen (m ³)	
Estructura primaria – EP	6708.21	6318.88
Estructura secundaria – ES	574.23	298.95
Volumen Total	7282.44	6617.83

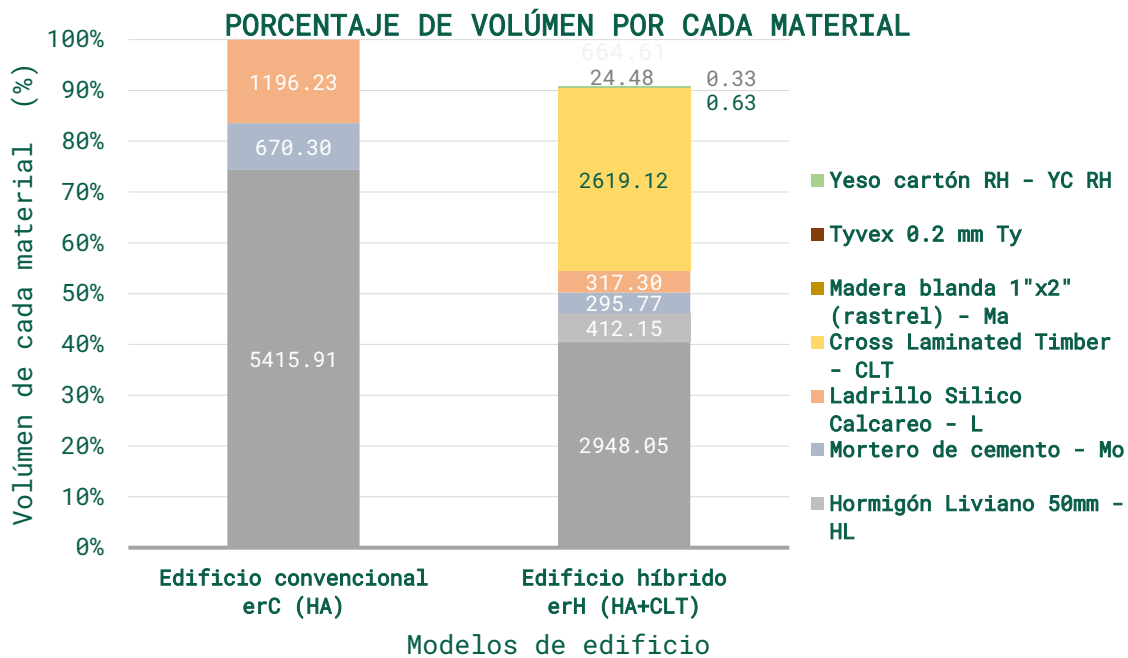
Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

El detalle de los resultados volumétricos obtenidos por modelo de edificación, elemento constructivo y tipo de material de construcción se aprecia en la Tabla 6 del Anexo.

El erH (HA + CLT) utiliza un total de 2619.75 m³ de madera con un 99.98% en CLT y 0.02% en madera aserrada. El ratio de utilización de madera masiva por m² de superficie construida es de 0.26 m³. Los muros perimetrales, divisorios entre U.I. y áreas comunes ocupan 941.81 m³ de CLT de 5 capas (35.96%), las tabiquerías de las U.I. utilizan 451.18 m³ de CLT de 3 capas (17.23%) y las losas 1226.13 m³ de CLT de 5 capas (46.81%).

En el caso del erC (HA) utiliza 5415.91 m³ de hormigón. El ratio de utilización de hormigón por m² de superficie construida es de 0.58 m³. La cimentación ocupa 449.67 m³ de hormigón (8.30%), la cisterna y los sótanos utilizan 1699.42 m³ (31.38%), los muros, las placas y las columnas ocupan 1519.65 m³ (29.06%) y las vigas y las losas utilizan 1747.20 m³ (32.26%).

Figura 10
Porcentaje de volumen por cada material de construcción.



Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Como se ve en la Figura 10, para ambos modelos de edificio (base y propuesto), el hormigón es el que tiene un mayor porcentaje en volumen. Para el edificio convencional, el hormigón representa el 74% del volumen total del edificio. Para el edificio híbrido, el hormigón representa el 50% del volumen del edificio, seguido por el CLT con 39%.

3.1.1.2. Coeficientes incorporado del material

En la Tabla 3, se presenta el dato de la carga incorporada de todos los materiales de construcción empleados en los modelos de edificación residencial. También se puede visualizar los coeficientes de almacenamiento de carbono biogénico para los materiales de base biológica, como es el caso de la madera aserrada y el CLT.

Por lo mencionado, se destaca la importancia del secuestro de carbono en materiales orgánicos, al considerar el carbono biogénico. Debido a que el empleo de estos materiales, hacen que el carbono se quede almacenado en su estructura a largo plazo.

Tabla 3

Coeficiente incorporado por cada material de construcción empleado en el ACV del edificio residencial.

Materiales de construcción a emplear en modelos	*Global Warming Potential (A1 -A3) / GWP (A1-A3) sin localización	Almacenamiento de CO ₂ biogénico	Estándar
Hormigón premezclado, 21 MPa (3045 psi), 1210N57B (UNION DE CONCRETERAS SA (UNICON))	260,0 kg de CO ₂ e/m ³ (*)	-	ISO 14040
Mortero, para revestimiento de paredes de mampostería en interiores y exteriores, 40-65% arena cálcica, 10-30% arena de sílice, 5-25% cemento Portland, 2203 Matrix Massa de Projeção (Votorantim Cimentos, planta de Camaçari)	0,21 kg de CO ₂ e/kg	-	EN15804+A1
Ladrillo de arcilla	0,24 kg de CO ₂ e/kg	-	EN15804+A1, EN15804+A2
Madera laminada cruzada (CLT), 481 kg/m ³ , contenido de humedad del 12 % (± 3 %) (One Click LCA)	166,6 kg de CO ₂ e/m ³	-874,50 kg de CO ₂ e/m ³	EN15804+A1, EN15804+A2
Hormigón celular ligero premezclado (hormigón celular, hormigón celular, hormigón celular), LC1; 1 MPa, 300 kg/m ³ , con EPS como agregado (0 % reciclado) (LCA en un clic)	275,84 kg de CO ₂ e/m ³	-	EN15804+A1, EN15804+A2
Listón de madera blanda (montante), secado al horno, cepillado, 440 kg/m ³ , 10 % de contenido de humedad, madera de coníferas (One Click LCA)	91,24 kg de CO ₂ e/m ³	-806,67 kg de CO ₂ e/m ³	EN15804+A1, EN15804+A2
Placa de yeso laminado resistente a la humedad, para aplicación exterior, 12,7 mm, 9,5 kg/m ² , X-terium (Saint-Gobain Plaka)	3,2 kg de CO ₂ e/m ²	-	EN15804+A1
Membrana de barrera de vapor, 0,1 kg/m ² , DiFoil (DAFA A/S)	0,55 kg de CO ₂ e/m ²	-	EN15804+A1, EN15804+A2

Nota. Datos tomados del resumen informativo de la herramienta Planetary One Click LCA, 2024.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

3.2. Segundo objetivo específico

Determinar si en una edificación en altura híbrida de hormigón y madera masiva, se logra una reducción significativa del CO₂e incorporado, cuando se compara con una edificación convencional de hormigón armado.

3.2.1. Fase 3: Evaluación de impacto

Del resultado del cálculo, de la asociación de las cuantificaciones de materiales con los coeficientes de la categoría de impacto a evaluar (Global Warming Potential), se puede evaluar que tanto se ha cumplido con el planteamiento de la hipótesis.

3.2.1.1. Carbono incorporado

En la Tabla 4 y 5 se presenta un resumen de la carga incorporada inicial total de cada modelo de edificio residencial. Así como también, la carga incorporada por m² de superficie construida, este último cálculo se obtiene de dividir el valor del CIIT entre el área construida (9417.06m²) de la edificación.

Se puede observar que en la Tabla 4, Escenario 1: Fósil, no consideran el almacenamiento del carbono biogénico en los materiales de base biológica (madera y CLT), solo se toma el coeficiente incorporado del GWP (A1 – A3).

Tabla 4
CIIT sin considerar el carbono incorporado – Escenario 1: Fósil.

Material	MODELO DE EDIFICACIÓN							
	Base – erC (HA)				Propuesto – erH (HA+CLT)			
	Q _m	W _m	E _m	CIIT	Q _m	W _m	E _m	CIIT
m ³ – kg	%	Kg CO ₂ e/m ³ Kg CO ₂ e/kg Kg CO ₂ e/m ²	Kg CO ₂ e	m ³ – kg – m ²	%	Kg CO ₂ e/m ³ Kg CO ₂ e/kg Kg CO ₂ e/m ²	Kg CO ₂ e	
HA	5415.91	1.05	260.00	1478543.43	2948.05	1.05	260.00	804817.65
L	1673870.13	1.05	0.24	421815.27	448354.89	1.05	0.24	112985.43
M	346107.53	1.10	0.21	79950.84	154999.41	1.10	0.21	136675.66
CLT					2619.12	1.10	166.60	479979.93
HL					412.15	1.05	275.84	119371.83
MA					0.63	1.10	91.24	63.23
Ty					1632.17	1.10	0.55	987.46
YC					1632.17	1.15	3.20	6006.39
			CIIT	2210594.42			CIIT	1660887.58
			CIIT/m ²	234.75			CIIT/m ²	176.37

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

En la Tabla 5, Escenario 2: Biocarbón, si se considera el almacenamiento del carbono biogénico de los materiales maderables. En este escenario, el valor que se considera como coeficiente incorporado, es la diferencia de este mismo con el coeficiente de almacenamiento de CO₂e.

Tabla 5
CIIT considerando el carbono biogénico – Escenario 2: Biocarbón.

Material	MODELO DE EDIFICACIÓN							
	Base – erC (HA)				Propuesto – erH (HA+CLT)			
	Q _m	W _m	E _m	CIIT	Q _m	W _m	E _m	CIIT
m ³ – kg	%	Kg CO ₂ e/m ³ Kg CO ₂ e/kg Kg CO ₂ e/m ²	Kg CO ₂ e	m ³ – kg – m ²	%	Kg CO ₂ e/m ³ Kg CO ₂ e/kg Kg CO ₂ e/m ²	Kg CO ₂ e	
HA	5415.91	1.05	260.00	1478543.43	2948.05	1.05	260.00	804817.65
L	1673870.13	1.05	0.24	421815.27	448354.89	1.05	0.24	112985.432
M	346107.53	1.10	0.21	79950.84	154999.41	1.10	0.21	35804.8637
CLT					2619.12	1.10	-707.90	-2039482.55
HL					412.15	1.05	275.84	119371.829
MA					0.63	1.10	-715.43	-495.79299
Ty					1632.17	1.10	0.55	987.46285
YC					1632.17	1.15	3.20	6006.3856
			CIIT	2210594.42			CIIT	-859133.93
			CIIT/m ²	234.75			CIIT/m ²	-91.23

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

El detalle de los resultados de carga incorporada obtenidos por modelo de edificación, elemento constructivo y tipo de material de construcción se aprecia en la Tabla 7 y Tabla 8 del Anexo.

La carga incorporada del modelo base resultó 234 kgCO₂e/m². Mientras que para el modelo equivalente contamos con dos resultados, el primer valor para el Escenario Fósil es de 176 kgCO₂e/m², 58 puntos menos que el modelo base; y el segundo calculo para el Escenario Biocarbón resulto -91 kgCO₂e/m², siendo 325 puntos menos en comparación al modelo base.

3.2.1.2. Verificación de Hipótesis

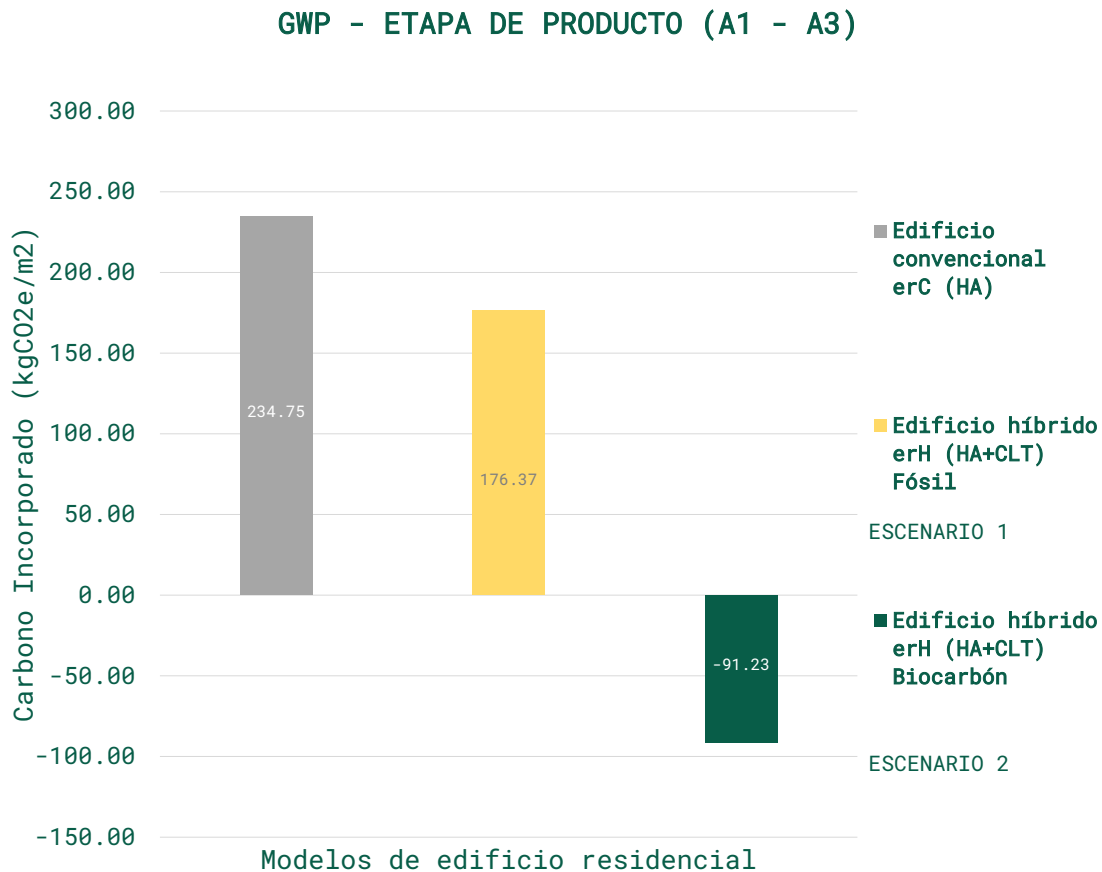
La carga incorporada inicial total (CIIT) para la categoría de impacto GWP está expresada en kgCO₂e/m² de superficie construida. En la Figura 11, se aprecia ambos modelos de edificio; así como también, los dos escenarios planteados diferenciados en la consideración del almacenamiento de carbono biogénico.

Para el primer escenario, donde no se considera el carbono biogénico, la contribución al calentamiento global del erH(HA+CLT) es de 24.87% menor que el erC(HA); y para el segundo escenario, donde se considera el carbono biogénico, la contribución del erH(HA+CLT) es de 138.86% menor que el erC(HA).

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Por lo señalado, no se cumple la hipótesis planteada para el Escenario Fósil, puesto que solo hay una reducción del 25%, mientras que en la hipótesis se plantea una reducción del 50% en la categoría de impacto que se ha evaluado (GWP). Pero si se cumple, para el Escenario Biocarbón, en el que se presenta una reducción del 139% de la categoría evaluada, superando lo planteado.

Figura 11
GWP - Etapa de producto (A1 - A3).



Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

El carbono biogénico es el carbono secuestrado, por la madera y otros materiales de origen orgánico, durante su crecimiento mediante el proceso químico de la fotosíntesis (Henandez y Méndez, 2024), donde el árbol fija el carbono del CO₂ en su estructura; es por ello que queda almacenado en la madera mientras está en uso, ya que una vez descartada para descomposición o combustión, este carbono nuevamente se libera al medio ambiente.

La Figura 12, muestra el carbono incorporado por elemento constructivo (muros, losas y terminaciones). Para el edificio híbrido en el escenario 1, donde no se considera el carbono

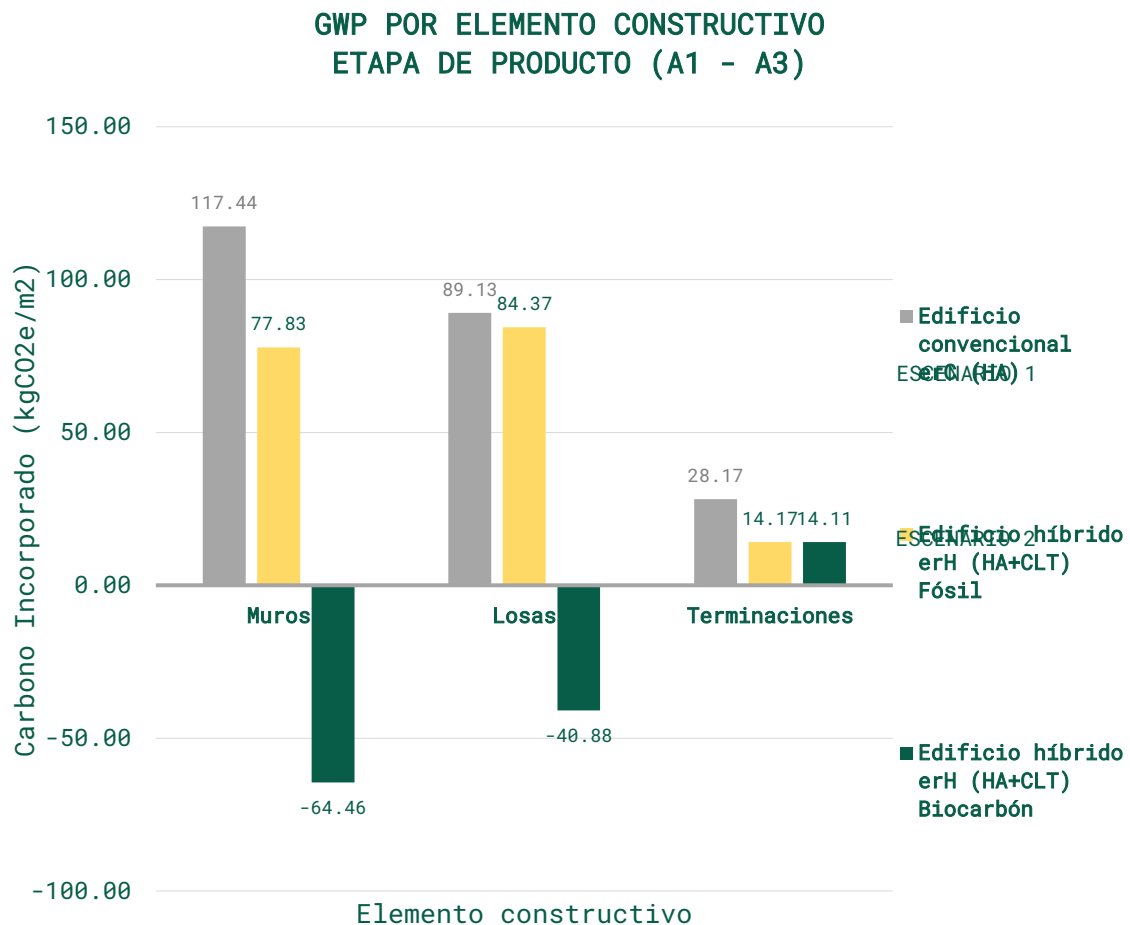
Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

biogénico, se aprecia que los muros y las losas presentan carga de 77.83 kgCO₂e/m² y 84.37 kgCO₂e/m² respectivamente, representando el 91.97% del carbono incorporado para el edificio híbrido.

Para el escenario 2, donde se considera el carbono biogénico, se muestra que las cargas del carbono biogénico se distribuyen en los muros, las losas y las terminaciones, con incidencias de -70.65%, -44.81% y 15.47% respectivamente.

También podemos apreciar que para los muros, el Escenario 1 presenta una reducción de 34% y para el Escenario 2 presenta una reducción de 155%. En cambio para las losas, para el primer escenario no hay una reducción significativa, siendo esta solo del 5%, y para el segundo escenario hay una reducción de 146%.

Figura 12
GWP por elemento constructivo, etapa de producto (A1 - A3).



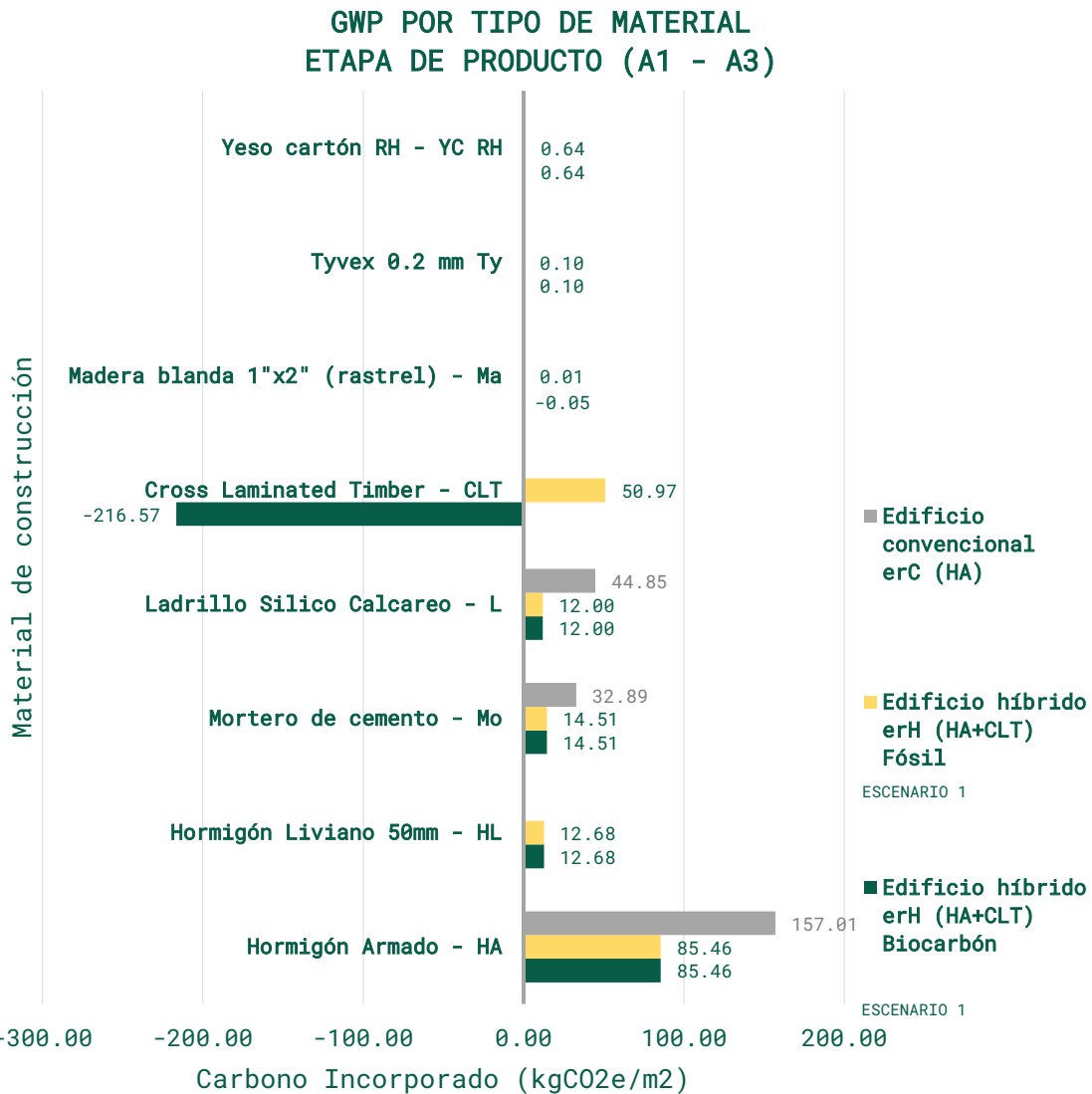
Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

En la Figura 13, se puede apreciar el impacto negativo del CLT y la madera blanda, para el escenario 2 (considera el carbono biogénico), con $-216.57 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ y $-0.05 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ respectivamente; en contraposición para el escenario 1 (no se considera el biocarbón), se tiene $50.97 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ y $0.01 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ para los mismos materiales respectivamente.

Enfocándonos en los resultados del reemplazo parcial de la estructura primario por CLT, se puede ver que, para el Escenario Fósil, hay una mínima de 13%; mientras que para el Escenario Biocarbón hay una reducción de 183% de carbono incorporado.

Figura 13
GWP por tipo de material, etapa de producto (A1 - A3).



Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

3.2.1.3. Supuestos

En este punto se detalla los supuestos que se consideraron para el desarrollo de la presente investigación, lo que permitirá transparentar los criterios que se asumieron.

- Primer supuesto: para el desarrollo del presente estudio, el edificio convencional es un modelo que llegó con todas las consideraciones técnicas (diseño arquitectónico y cálculo estructural) desarrolladas por profesionales especializados, de acuerdo a las normativas peruanas. En cambio, el edificio híbrido es un modelo aproximado, puesto que se consideró para su planteamiento recomendaciones (espesores de muros y losas) de un técnico especialista en construcción en madera masiva de la empresa Niuform, no desarrollándose cálculos estructurales.
- Segundo supuesto: la cimentación, la cisterna, la estructura de los tres sótanos, el primer nivel y los núcleos de circulación vertical (escalera de emergencia y ascensor) se mantuvieron equivalentes para ambos modelos. Puesto que, el modelo convencional cuenta con cálculo estructural, por esta razón, se mantuvo una estructura equivalente para el modelo híbrido.
- El tercer supuesto que se asumió para el modelado de las terminaciones, fue para el edificio híbrido; donde sólo se modeló, en cuanto a las terminaciones, la estructura de la fachada externa (rastrel + membrana + yeso cartón) que está en contacto con el medio ambiente, para proteger a la estructura primaria (muros de CLT) de la degradación ambiental. Puesto que para el edificio convencional se consideró el volumen del tarrajeo tanto para los muros interiores y exteriores como del el cielo raso.
- Cuarto supuesto que se asumió para el desarrollo del inventario, fue no emplear un software especializado en ACV para hallar los resultados de impacto en la categoría ya descrita (GWP). Recalcar, que de la herramienta Planetary One Click LCA, sólo se extrajo los resúmenes de las Declaraciones Ambientales de Producto, y a su vez los coeficientes de GWP (A1 – A3). De forma análoga, con la fórmula indicada líneas arriba, se realizó el cálculo para hallar la carga incorporada inicial total por tipo de edificación.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

4. Discusión de resultados

4.1. Resultados de estudios similares

4.1.1. Comparative Life – Cycle assessment of a mass timber building and concrete alternative

El estudio pertenece a la Society of Wood Science and Technology y fue desarrollado por Liang, Gu, Bergman y Kelley, y publicado el 2020.

La investigación presenta un ACV comparativo de un edificio de uso mixto (departamentos y oficinas), de 12 pisos, el cual cuenta con un área techada de 8360m², ubicado en Portland. Construido principalmente en madera masiva (CLT y glulam), la madera reemplaza aproximadamente el 58% del concreto y el 72% del acero de refuerzo que se habría utilizado en un edificio convencional.

Los límites del sistema del estudio se definen como “de la cuna al sitio”, donde se incluye la Etapa de producto (A1 – A3) y la Etapa de construcción (A4 – A5). Las categorías que se evaluaron fueron el GWP, el agotamiento de ozono y la eutrofización.

4.1.1.1. Resultados

Comparación de materiales de construcción: Para el edificio de madera masiva, el ratio de uso de madera masiva por m² de superficie resultó 0.28m³; y para el edificio de convencional, el ratio resultó 0.31m³ del empleo de concreto.

Análisis de impacto ambiental: Solo vamos a considerar el valor obtenido de la contribución al calentamiento global. Para el edificio de madera masiva se encontró que es 18% más bajo (193 kgCO₂e/m²) que la del edificio de concreto (237 kgCO₂e/m²).

De las dos etapas analizadas, la Etapa de producto es la principal contribuyente, representando el 88 – 98% en todas la categorías evaluadas para los dos edificios.

El estudio realizó un análisis de sensibilidad, el cual mostró que los impactos ambientales relacionados al transporte de CLT (procedencia europea), podrían revertir las ventajas de todas las categorías de impacto estudiadas para el edificio de madera masiva.

4.1.2. A lifecycle assessment of a low – energy mass – timber building and mainstream concrete alternative in central Chile

La investigación fue financiada por el USDA Forest Service y desarrollado por Felmer, Morales – Vera, Astroza, Gonzáles, Puettmann y Wishnie; y publicado en el 2022.

El objetivo del estudio fue evaluar la huella de carbono de un edificio residencial de mediana altura de bajo consumo de energía localizado en Santiago, cuando emplea madera maciza en su estructura y a su vez compararlo con un edificio equivalente de hormigón. Cuenta con una superficie habitable de 1405m².

Los límites del sistema del ACV de la investigación se da “de la cuna hasta la construcción”, donde se considera la Etapa de producto y la etapa de construcción; y el uso de energía para acondicionamiento del espacio durante toda la vida útil del edificio (módulo B6) durante

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

un horizonte de vida útil de 50 años. La unidad funcional declarada es el m² de superficie habitable total.

4.1.2.1. Resultados

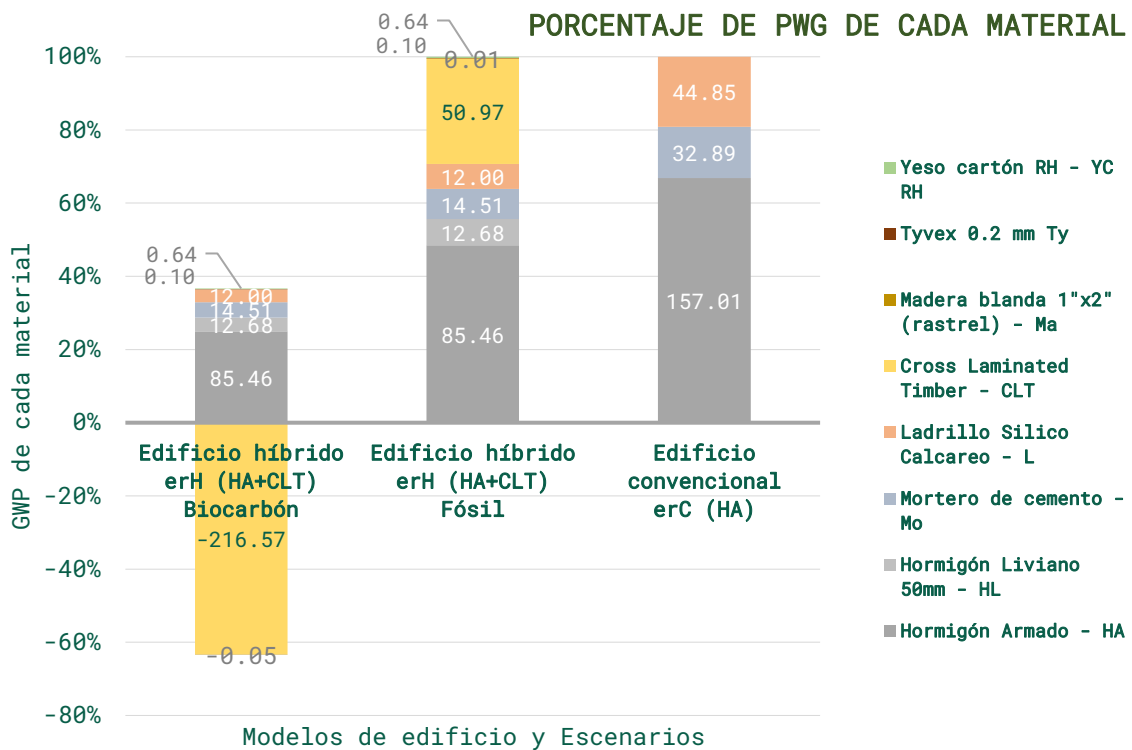
Cantidad de materiales: Para el edificio de bajo consumo energético en madera maciza, obtuvieron que el 97% del volumen ocupado fue de CLT y glulam, el ratio de utilización de madera maciza es aproximadamente 0.38m³ por m² de superficie construida; y para el edificio de hormigón armado, el hormigón representa el 98% de la masa total, y su ratio de empleo de hormigón es de 0.46m³.

Carbono incorporado: Para ambos edificios, más del 96% de carbono incorporado total se genera en la Etapa de producto. En esta etapa, la contribución al calentamiento global del edificio de bajo consumo energético resulto 44% menor (90 kgCO₂e/m²) que el edificio convencional (162 kgCO₂e/m²), atribuible al empleo de madera maciza y a las combinaciones de la diferentes fuentes de energía del país.

4.2. Resultados y contraste del presente estudio

4.2.1. Fase 4: Interpretación de resultados

Figura 14
Porcentaje de GWP por cada material.



Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

De los resultados obtenidos, el edificio híbrido presenta un menor impacto en comparación al edificio convencional (HA), 25% menor. Según el resultado obtenido para GWP fósil, este método de cuantificación de carbono biogénico se puede plantear para Perú, puesto que el sector forestal no tiene desarrollado una gestión sostenible al 100%. Por lo que, para reducir aún más el impacto ambiental, se debe realizar un análisis del GWP por tipo de material, para plantear propuestas y soluciones de diseño que ayuden a reducir la carga incorporada.

Para una revisión de los datos representados en la Figura 14, podemos plantear algunas propuestas sugeridas también en la investigación de Felmer. Para ambos modelos (híbrido y convencional), el mortero de cemento (erC – 14% y erH – 8%) y el ladrillo (erC – 19% y erH – 6%) presentan considerable huella; por lo que, se plantea anular su empleo o reducir al mínimo o reemplazar por otro material de menos impacto ambiental. Para un análisis más profundo, se debe incluir más materiales al estudio y también considerar más etapas de ACV para la evaluación y comparación más precisa.

Otro punto es lo que se conoce del planteamiento del edificio híbrido, el cual no cuenta con cálculo estructural, al efectuarse se obtendría resultados a nivel de masa y volumen más ajustados, por lo que la huella de carbono se reduciría. Se puede suponer que, se puede lograr alcanzar una reducción adicional de 7% más, logrando alcanzar los valores de reducción de estudios similares que se ubican en el Cinturón de fuego del Pacífico.

Finalmente se puede apreciar, que, a pesar de las diferencias en el alcance, del estudio presente y los dos estudios similares analizados y referenciados; las diferencias de los ratios tanto de hormigón como de madera masiva es mínima.

Lo que si podemos distinguir es la diferencia del porcentaje de reducción de la categoría a contrastar (GWP) para los tres estudios. Estos resultados están directamente influenciados por los módulos que se evalúan de acuerdo a su alcance. Teniendo en cuenta que el resultado de la Etapa de producto (carbono incorporado) representa, para el estudio de Felmer y Liang, más del 95% del resultado total.

4.3. Limitaciones del estudio

En el transcurso del desarrollo del presente estudio, al realizar el ACV de los modelos de edificio residencial, utilizando la base de datos y los resúmenes de las Declaraciones ambientales de productos – DPA de Planetary One Click LCA, se presentaron limitaciones a destacar, las cuales fueron:

- Evaluar sólo el “casco” (estructura primaria y secundaria) de ambos modelos, en la etapa de producto.
- El modelo equivalente de edificación híbrida no cuenta con cálculo estructural, sino sólo con experiencia empírica.
- La ubicación en una zona sísmica en la costa peruana, podría condicionar la proporción de CLT y hormigón.
- Los modelos no sean 100% idénticos en la distribución espacial, debido a los tipos de sistema constructivo en empleados para su proyección.
- No encontrar materiales específicos de fabricantes locales en la base de datos de Planetary.
- Falta de DPA locales específicas de materiales empleados en Perú.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

5. Conclusiones

Se realizó un ACV para estudiar las implicancias del carbono incorporado en un edificio residencial típico de mayor demanda en Lima (modelo base), en sistema constructivo convencional en hormigón armado, y compararlo con un mismo tipo de edificio (modelo propuesto), en sistema constructivo híbrido – hormigón armado y CLT. El límite planteado comprendía la etapa de producto del ACV (A1: suministro de materia prima, A2: transporte de materia prima y A3: manufactura de producto). Para ambos modelos de edificio, el hormigón armado representó el mayor porcentaje total de volumen, para el erC(HA) el hormigón representó el 74% y para el erH(HA+CLT) fue del 50%. En este último edificio, los materiales de madera maciza como el CLT y madera aserrada (rastrel) representaron el 39% y 0.01% respectivamente. El potencial de calentamiento global para el modelo convencional e híbrido (escenario 1 – fósil) se estimó en 234.75 y 176.37 kgCO₂e/m², obteniendo una reducción del 25% de emisiones de carbono cuando se reemplazó la estructura de hormigón desde el segundo a noveno nivel más la azotea por productos de CLT en muros y losas.

Cuando se considera en el edificio híbrido el carbono biogénico (escenario 2) se estimó un PCG de -91.23 kgCO₂e/m², reduciendo las emisiones en un 138% en comparación en el modelo convencional equivalente. Finalmente, el reemplazo de productos maderables como el CLT y la madera aserrada en un edificio residencial típico y de mayor demanda en la ciudad de Lima de sistema constructivo convencional, genera beneficios para el medio ambiente, disminuyendo las emisiones en la categoría de potencial de calentamiento global.

El aporte del presente estudio radica en ser un punto de partida que contrasta la huella de carbono de materialidades de construcción de base biológica con otras materialidades convencionales en el territorio peruano. También sirve de base, para generar estudios del impacto ambiental de todo el parque residencial, planteando soluciones de diseño sostenible que ayuden a alcanzar la meta país de carbono neutralidad.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

6. Glosario

- Medio ambiente: Compendio de valores naturales, sociales y culturales existentes en un lugar y en un momento determinado que influye en la vida material y psicológica del hombre (Organización de los Estados Americanos, s.f.).

- Impacto ambiental: El impacto ambiental es definido como la alteración del medio ambiente por causas de origen humano (guerras, disposición de desechos, actividad industrial, etc.) o natural (catástrofes), produciendo un efecto significativo en el balance de los ecosistemas (B. Cabello referencia a Uriarte, 2020).

- Gases de efecto invernadero (GEI): Son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad produce el efecto invernadero. En la atmósfera de la Tierra, los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal como el hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (H. Benavides y G. León, 2007). Cualquier gas que tiene la propiedad de absorber radiación infrarroja (energía térmica neta) emitida desde la superficie de la Tierra y reirradiar hacia la superficie de la Tierra, contribuyendo así al efecto invernadero. El dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua son los GEI más importantes. (En menor medida, el ozono superficial, los óxidos nitrosos y los gases fluorados). Las concentraciones de GEI han variado durante la historia de la Tierra, y estas variaciones han impulsado a cambios sustanciales en el clima (M. Mann, 2025).

- Potencial de calentamiento global: Es una medida de referencia. La metodología y la ciencia detrás del cálculo pueden considerarse una de las categorías de análisis de inventario de vida más aceptadas. El PCG se expresa sobre una base de equivalencia en relación con el CO_2 , en kg o toneladas de CO_2 equivalente. (B. Cabello referencia a Athena Impact Estimator, 2019).

- Sistema constructivo: Conjunto integral de materiales de construcción que, combinados según lineamientos técnicos precisos, es decir, según un determinado proceso constructivo, construyen edificios u obra de ingeniería (Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, 2021).

- Edificio residencial: Es un tipo de construcción que está destinada a la habitabilidad de familias, individuos o grupos. Tiene por objetivo ser ocupados con fines residenciales. Pueden ser casas unifamiliares, edificios de departamentos, condominios, entre otros.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

- Madera masiva: es un material de vanguardia que prioriza recursos renovables y prácticas de construcción sostenibles. Compuesta por una amplia gama de productos de madera ingeniería, como: la madera laminada cruzada (CLT), la madera laminada encolada (glulam) y la madera microlaminada (LVL), resultando ideal para aplicaciones que requieren resistencia y estabilidad dimensional.
- Carbono incorporado (carbono incorporado inicial o carbono inicial): Se refiere a las emisiones de GEI que se liberan antes de que un edificio o infraestructura comience a usarse, que en gran medida provienen de los impactos de la extracción de materias primas, transporte y fabricación de productos (M. Lewis y otros, 2021).
- Carbono biogénico: Es el carbono liberado a la atmósfera, después de un proceso de descomposición de plantas y animales, dicho carbono ha sido absorbido del CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis y la respiración, y transmitido al resto de organismos vivos mediante la cadena alimenticia (C. Gonda, 2023).
- Carbono secuestrado: Es el almacenamiento a largo plazo de carbono en planta, suelos, formaciones geológicas y el océano. Ocurre tanto de manera natural como resultado de actividades antropogénicas y generalmente se refiere al almacenamiento de carbono que tiene el potencial inmediato de convertirse en CO₂. En respuesta a las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático, resultado del aumento de CO₂, por lo que se ha despertado considerable interés en la posibilidad de aumentar la tasa de secuestro de carbono mediante cambios en el uso de la tierra, la silvicultura y técnicas de geoingeniería como la captura y almacenamiento de carbono (N. Eckley, 2024).
- Biocarbón: Procesamiento de biomasa vegetal por medio de la pirólisis y posterior aplicación a los suelos (C. Gonda, 2023). Forma de carbón vegetal elaborado a partir de desechos animales y residuos vegetales (como astillas de madera, hojas y cáscaras) que se someten a pirólisis, un proceso que descompone rápidamente la materia orgánica mediante calentamiento anaeróbico. El biocarbón también es útil para secuestrar carbono al evitar el proceso normal de descomposición o actuar como fertilizante para mejorar la tasa de secuestro de la biomasa en crecimiento (Editores de la Enciclopedia Británica, 2025).

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

7. Referencias bibliográficas

Bunster, V. (2021). *Life cycle environmental assessment (LCEA)*. Archivo de video personal de la tesista L. Carbajal.

Cabello, B. y Dongo, I. (2022). *Construcción de un Edificio Multifamiliar Aplicando la Metodología de Análisis de ciclo de Vida en Huancayo* (tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C., et al. (2020). *Buildings as a global carbon sink*. doi: 10.1038/s41893-019-0462-4

Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E. y Pekar, F. (2024). *GHG emissions of all world countries*. doi:10.2760/4002897.

Dolezal, F., Dornigg, I., Wurm, M. y Figl, H. (2021). *Overview and Main Findings for the Austrian Case Study*. doi: 10.3390/su13147584.

Felmer, G., Morales, R., Astroza, R., González, I., Puettmann, M. y Wishnie, M. (2022). *A Lifecycle Assessment of a Low-Energy Mass-Timber Building and Mainstream Concrete Alternative in Central Chile*. doi: 10.3390/su14031249.

Gonda, C. (2023). *Remoción de dióxido de carbono y compensación de emisiones: impactos, riesgos y limitaciones*. Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN).

Hegarty, R. y Kinnane, O. (2023). *A whole life carbon analysis of the Irish residential sector - past, present and future*. doi: 10.1016/j.egycc.2023.100101.

Hernández, H., Cabo, A. y Martínez I. (2019). *Análisis de ciclo de vida en viviendas: un caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social*. doi: 10.20868/ade.2019.4374.

Hernández, H. y Méndez, D. (2024). *Análisis de Ciclo de Vida para vivienda "prototipo V4PROTRU"*.

Himes, A. y Busby, G. (2020). *Wood buildings as a climate solution*. doi: 4. 10.1016/j.dibe.2020.100030.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) (2007). *Norma técnica colombiana NTC – ISO 14040, Gestión ambiental, Análisis de ciclo de vida, Principios y marco de referencia*. Recuperado de <http://ciberinnova.edu.co/archivos/plantilla-ovas1-slide/documents-UCN-Canvas/impacto-ambiental/Unidad%201/5%20N%20TC-ISO%2014040-2007%20Ciclo%20de%20Vida.pdf>

Lewis, M., Huang, M., Carlisle, S. y Simonen, K. (2021). PART III: Strategies for reducing embodied carbon. *AIA-CLF Embodied Carbon Toolkit for Architects*. Disponible en <https://carbonleadershipforum.org/clf-architect-toolkit/>

Liang, S., Gu, H., Bergman, R. y Kelley, S. (2020). 4.2.1. *Comparative Life – Cycle assessment of a mass timber building and concrete alternative*. doi: 10.22382/wfs-2020-019.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Mann, M. (2025, febrero 26). Greenhouse gas. *Encyclopedia Britannica* [versión electrónica]. <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas>

Ministerio del Ambiente (2015). *Estrategia nacional ante el cambio climático 2015*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/estrategia-nacional-ante-cambio-climatico-2015>

Ministerio del Ambiente (2020). *Ley marco sobre cambio climático y su reglamento*. Recuperado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1230066/200812_Ley_Marco_sobre_Cambio_Clim%C3%A1tico.pdf

Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2021). *Modificación de la norma técnica G.040, Definiciones del reglamento nacional de edificaciones (G.040)*. Recuperado de https://cdn-web.construccion.org/normas/files/vivienda/RM_029-2021-Vivienda.pdf

Ministerio de vivienda construcción y saneamiento. (2024). *Expansión urbana en el Perú: Proyección del déficit habitacional en tres ciudades principales mediante el análisis espaciotemporal del cambio de uso de suelo utilizando métodos de machine learning*. (Documento de trabajo N° 1). Recuperado de <https://www.gob.pe/institución/vivienda/informes-publicaciones/5960863-expansion-urbana-en-el-peru-proyeccion-del-deficit-habitacional-en-tres-ciudades-principales-mediante-el-analisis-espaciotemporal-del-cambio-de-uso-de-suelo-utilizando-metodos-de-machine-learning>

O Hegarty, R. y Kinnanne O. (2023). *A whole life carbon analysis of the Irish residential sector - past, present and future, Energy and Climate Change*. doi: 10.1016/j.egycc.2023.100101.

One Click LCA (s.f.). *Building materials*. Recuperado el 11 de diciembre del 2024 de https://oneclicklcaapp.com/app/sec/query/form?indicatorId=lcaForPlanetary_LatinAmerica&childEntityId=675a256e4515f64fcc7ded84&queryId=buildingMaterialsQuery&entityName=Edificio+Multifamiliar_HACLT&childName=EM_HACLT&entityId=675a25453589e163b674a92e

Organización de los Estados Americanos. (s.f.). *Capítulo 5 - Medio ambiente*. Recuperado de <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea32s/ch23.htm>

Ouellet – Plamondon, C., Ramseier, L., Baluoktsi, M., Delem, L., Foliente, G. et al. (2023). *Carbon footprint assessment of a wood multi-residential building considering biogenic carbon*. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136834.

Pacheco, O. (2020). *El impacto ambiental de construcción de viviendas multifamiliares en la ciudad de Lima Análisis comparativo de los tipos arquitectónicos en base a la densidad urbana* (trabajo de fin de Máster). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Quintana – Gallardo, A., Schau, E., Prelovsek, E. y Burnard, M. (2021). *Comparing the environmental impacts of wooden buildings in Spain, Slovenia, and Germany*. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129587.

Selin, N. (2025, febrero 13). Carbon sequestration. *Encyclopedia Britannica* [versión electrónica]. <https://www.britannica.com/technology/carbon-sequestration>

Stamford, L. (2020). *Chapter 5 - life cycle sustainability assessment in the energy sector*. doi: 10.1016/B978-0-12-815581-3.00005-1.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

UCL, BPIE, PNUMA CCC, AIE. (2025). *Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall*. Recuperado de <https://globalabc.org/index.php/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-20242025-not-just-another>.

Vega, E., (05 de mayo del 2021). Crecimiento inmobiliario vertical de Lima muestra comportamientos diferenciados. *El Comercio*. Recuperado de <https://elcomercio.pe/economia/negocios/crecimiento-inmobiliario-vertical-de-lima-muestra-comportamientos-diferenciados-mercado-inmobiliario-capeco-tinsa-ncze-noticia/>

Zechmeister, C., Hildebrandt, H., Duque Estrada, R. et al. (2025). *Design and development of natural fiber-timber hybrid beam elements for sustainable construction*. doi: 10.1007/s44223-025-00083-6.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

8. Anexos

Tabla 6

Volumen por cada elemento constructivo y por tipo de edificación residencial.

ELEM.	NIVEL	MATERIAL	erC (HA)			erH (HA + CLT)		
			m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
Muro	Cimientos	HA	1.92	0.00	1.92	1.92	0.00	1.92
			1.92	0.00		1.92	0.00	
	Cisterna 04	HA	56.33	0.00	56.33	56.33	0.00	56.33
		Ladrillos	5.87	0.00	5.87	5.87	0.00	5.87
		Mortero	0.50	0.00	0.50	0.50	0.00	0.50
			62.70	0.00		62.70	0.00	
	S 03 - 01	HA	644.52	118.97	763.49	644.52	118.97	763.49
		Ladrillos	50.08	3.32	53.40	50.08	3.32	53.40
		Mortero	4.23	0.23	4.46	4.23	0.23	4.46
			698.83	122.52		698.83	122.52	
	N 1°	HA	133.88	31.26	165.14	133.88	31.26	165.14
		Ladrillos	113.40	14.73	128.13	113.40	14.73	128.13
		Mortero	5.07	1.25	6.32	5.07	1.25	6.32
			252.35	47.24		252.35	47.24	
	N 2° - 9°	HA	968.67	250.35	1219.02	0.00	250.35	250.35
		Ladrillos	840.95	129.15	970.10	0.00	129.15	129.15
		Mortero	70.76	10.92	81.68	0.00	10.92	10.92
		CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	864.55	0.00	864.55
		CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	412.17	0.00	412.17
			1880.38	390.42		1276.72	390.42	
A 10°	HA	74.57	60.92	135.49	0.00	60.92	60.92	
	Ladrillos	37.98	0.75	38.73	0.00	0.75	0.75	
	Mortero	3.05	0.06	3.11	0.00	0.06	0.06	
	CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	77.26	0.00	77.26	
	CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	39.01	0.00	39.01	
		115.60	61.73		116.27	61.73		
		3011.8	621.91	3633.7	2408.8	621.9	3030.7	
Losa	Cimientos	HA	446.92	0.80	447.72	446.92	0.80	447.72
			446.9	0.8		446.9	0.8	
	Cisterna 04	HA	56.33	23.91	80.24	56.33	23.91	80.24
			56.33	23.91		56.33	23.91	
	S 03 - 01	HA	734.31	65.05	799.36	734.31	65.05	799.36
			734.31	65.05		734.31	65.05	
	N 1°	HA	168.66	23.35	192.01	168.66	23.35	192.01
			168.66	23.35		168.66	23.35	
	N 2° - 9°	HA	1327.51	130.57	1458.08	0.00	130.57	130.57
		HL 50mm	0.00	0.00	0.00	410.01	0.00	410.01
		CLT 160mm	0.00	0.00	0.00	1103.75	0.00	1103.75
			1327.51	130.57		1513.76	130.57	
	A 10°	HA	97.11	0.00	97.11	0.00	0.00	0.00
HL 50mm		0.00	0.00	0.00	2.14	0.00	2.14	
CLT 160mm		0.00	0.00	0.00	122.38	0.00	122.38	
		97.11	0.00		124.52	0.00		
		2830.84	243.68	3074.52	3044.50	243.68	3288.18	
Terminación	Cisterna 04	Mortero	8.96	1.07	10.03	8.96	1.07	10.03
			8.96	1.07		8.96	1.07	
	S 03 - 01	Mortero	39.62	5.38	45.00	39.62	5.38	45.00
			39.62	5.38		39.62	5.38	
	N 1°	Mortero	30.54	17.55	48.09	30.54	17.55	48.09
			30.54	17.55		30.54	17.55	
	N 2° - 9°	Mortero	276.91	150.55	427.46	0.00	150.55	150.55
		Madera	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.62
		Tyvex	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.32
		Volcoglass	0.00	0.00	0.00	24.01	0.00	24.01
			276.91	150.55		24.95	150.55	
	A 10°	Mortero	23.81	19.84	43.65	0.00	19.84	19.84
		Madera	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Tyvex		0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	
Volcoglass		0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.47	
		23.81	19.84		0.49	19.84		
		379.84	194.39	574.23	104.56	194.39	298.95	

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Tabla 3A

CIIT sin considerar el almacenamiento del carbono biogénico del erC (HA) (escenario 1).

Edificio residencial Convencional en Hormigón Armado – erC (HA)								
ELEM.	NIVEL	MATERIAL	CANTIDA DE MATERIAL			COEF. DEP.	COEF. INCORPORADO kg CO2e/m3 kg CO2e/m2 kg CO2e/kg	CIIT kg CO2e
			m3 - m2 - kg					
Muros	Cimientos	HA	1.92	0.00	1.92	1.05	260.00	524.16
		HA	56.33	0.00	56.33	1.05	260.00	15378.09
	Cisterna	Ladrillos	8345.35	0.00	8345.35	1.05	0.24	2103.03
		Mortero	992.81	0.00	992.81	1.10	0.21	229.34
	S 03 - 01	HA	644.52	118.97	763.49	1.05	260.00	208432.77
		Ladrillos	70461.34	4716.57	75177.91	1.05	0.24	18944.83
		Mortero	8469.42	561.11	9030.53	1.10	0.21	2086.05
	N 1°	HA	133.88	31.26	165.14	1.05	260.00	45083.22
		Ladrillos	159228.78	20943.54	180172.32	1.05	0.24	45403.42
		Mortero	10141.59	2491.56	12633.15	1.10	0.21	2918.26
	N 2° - 9°	HA	968.67	250.35	1219.02	1.05	260.00	332792.46
		Ladrillo	1176876.00	183590.55	1360466.55	1.05	0.24	342837.57
		Mortero	141527.27	21840.94	163368.21	1.10	0.21	37738.06
		CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
		CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
	Azotea	HA	74.57	60.92	135.49	1.05	260.00	36988.77
		Ladrillos	50729.35	1068.76	51798.11	1.05	0.24	13053.12
		Mortero	6094.05	127.15	6221.20	1.10	0.21	1437.10
		CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
		CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
Losas	Cimientos	HA	446.92	0.80	447.72	1.05	260.00	122227.56
		HA	56.33	23.91	80.24	1.05	260.00	21905.52
	Cisterna	HA	56.33	23.91	80.24	1.05	260.00	21905.52
	S 03 - 01	HA	734.31	65.05	799.36	1.05	260.00	218225.28
	N 1°	HA	168.66	23.35	192.01	1.05	260.00	52418.73
	N 2° - 9°	HA	1327.51	130.57	1458.08	1.05	260.00	398055.84
		HL 50mm	0.00	0.00	0.00	1.05	275.84	0.00
		CLT 160mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
	Azotea	HA	97.11	0.00	97.11	1.05	260.00	26511.03
		HL 50mm	0.00	0.00	0.00	1.05	275.84	0.00
CLT 160mm		0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00	
Terminaciones	Cisterna	Mortero	17915.64	2142.37	20058.01	1.10	0.21	4633.40
		Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
	S 03 - 01	Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
	N 1°	Mortero	61087.51	35102.28	96189.79	1.10	0.21	22219.84
	N 2° - 9°	Mortero	553816.74	301103.74	854920.48	1.10	0.21	197486.63
		Madera	0.00	0.00	0.00	1.10	-715.43	0.00
		Tyvex	0.00	0.00	0.00	1.10	0.55	0.00
		Volcoglass	0.00	0.00	0.00	1.15	3.20	0.00
	Azotea	Mortero	47624.09	39687.11	87311.20	1.10	0.21	20168.89
		Madera	0.00	0.00	0.00	1.10	-715.43	0.00
Tyvex		0.00	0.00	0.00	1.10	0.55	0.00	
Volcoglass		0.00	0.00	0.00	1.15	3.20	0.00	
							kg CO2 e	2210594.42
							Tn CO2 e	2210.59
							kg CO2 e/m2	234.75

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Tabla 4B

CIIT sin considerar el almacenamiento del carbono biogénico del erH (HA + CLT) (escenario 1).

Edificio residencial Híbrido en Hormigón Armado y Madera Contralaminada – erH (HA – CLT)								
ELEM.	NIVEL	MATERIAL	CANTIDA DE MATERIAL			COEF. DEP.	COEF. INCORPORADO kg CO2e/m3 kg CO2e/m2 kg CO2e/kg	CIIT kg CO2e
			m3 - m2 - kg					
Muros	Cimientos	HA	1.92	0.00	1.92	1.05	260.00	524.16
		HA	56.33	0.00	56.33	1.05	260.00	15378.09
	Cisterna	Ladrillos	8345.35	0.00	8345.35	1.05	0.24	2103.03
		Mortero	992.81	0.00	992.81	1.10	0.21	229.34
	S 03 - 01	HA	644.52	118.97	763.49	1.05	260.00	208432.77
		Ladrillos	70461.34	4716.57	75177.91	1.05	0.24	18944.83
		Mortero	8469.42	561.11	9030.53	1.10	0.21	2086.05
	N 1°	HA	133.88	31.26	165.14	1.05	260.00	45083.22
		Ladrillos	159228.78	20943.54	180172.32	1.05	0.24	45403.42
		Mortero	10141.59	2491.56	12633.15	1.10	0.21	2918.26
	N 2° - 9°	HA	0.00	250.35	250.35	1.05	260.00	68345.55
		Ladrillo	0.00	183590.55	183590.55	1.05	0.24	46264.82
		Mortero	0.00	21840.94	21840.94	1.10	0.21	5045.26
		CLT 130mm	864.55	0.00	864.55	1.10	166.60	158437.43
		CLT 90mm	412.17	0.00	412.17	1.10	166.60	75534.27
	Azotea	HA	0.00	60.92	60.92	1.05	260.00	16631.16
		Ladrillos	0.00	1068.76	1068.76	1.05	0.24	269.33
		Mortero	0.00	127.15	127.15	1.10	0.21	29.37
CLT 130mm		77.26	0.00	77.26	1.10	166.60	14158.67	
CLT 90mm		39.01	0.00	39.01	1.10	166.60	7148.97	
Losas	Cimientos	HA	446.92	0.80	447.72	1.05	260.00	122227.56
		HA	56.33	23.91	80.24	1.05	260.00	21905.52
	S 03 - 01	HA	734.31	65.05	799.36	1.05	260.00	218225.28
	N 1°	HA	168.66	23.35	192.01	1.05	260.00	52418.73
		HA	0.00	130.57	130.57	1.05	260.00	35645.61
		HL 50mm	410.01	0.00	410.01	1.05	275.84	118752.02
	N 2° - 9°	CLT 160mm	1103.75	0.00	1103.75	1.10	166.60	202273.23
		HA	0.00	0.00	0.00	1.05	260.00	0.00
		HL 50mm	2.14	0.00	2.14	1.05	275.84	619.81
	Azotea	CLT 160mm	122.38	0.00	122.38	1.10	166.60	22427.36
		Mortero	17915.64	2142.37	20058.01	1.10	0.21	4633.40
		Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
Terminaciones	S 03 - 01	Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
		Mortero	61087.51	35102.28	96189.79	1.10	0.21	22219.84
	N 1°	Mortero	61087.51	35102.28	96189.79	1.10	0.21	22219.84
		Mortero	0.00	301103.74	301103.74	1.10	0.21	69554.96
		Madera	0.62	0.00	0.62	1.10	91.24	62.23
		Tyvex	1600.89	0.00	1600.89	1.10	0.55	968.54
	N 2° - 9°	Volcoglass	1600.89	0.00	1600.89	1.15	3.20	5891.28
		Mortero	0.00	39687.11	39687.11	1.10	0.21	9167.72
		Madera	0.01	0.00	0.01	1.10	91.24	1.00
		Tyvex	31.28	0.00	31.28	1.10	0.55	18.92
Azotea	Volcoglass	31.28	0.00	31.28	1.15	3.20	115.11	
	Mortero	0.00	39687.11	39687.11	1.10	0.21	9167.72	
	Madera	0.01	0.00	0.01	1.10	91.24	1.00	
							kg CO2 e	1660887.58
							Tn CO2 e	1660.89
							kg CO2 e/m2	176.37

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Tabla 5A

CIIT considerando el carbono biogénico en los modelos de edificio residencial (escenario 2).

Edificio residencial Convencional en Hormigón Armado – erC (HA)								
ELEM.	NIVEL	MATERIAL	CANTIDAD DE MATERIAL			COEF. DESP.	COEF. INCORPORADO kg CO2e/m3 kg CO2e/m2 kg CO2e/kg	CIIT kg CO2e
			m3 - m2 - kg					
Muros	Cimientos	HA	1.92	0.00	1.92	1.05	260.00	524.16
		HA	56.33	0.00	56.33	1.05	260.00	15378.09
	Cisterna	Ladrillos	8345.35	0.00	8345.35	1.05	0.24	2103.03
		Mortero	992.81	0.00	992.81	1.10	0.21	229.34
	S 03 - 01	HA	644.52	118.97	763.49	1.05	260.00	208432.77
		Ladrillos	70461.34	4716.57	75177.91	1.05	0.24	18944.83
		Mortero	8469.42	561.11	9030.53	1.10	0.21	2086.05
	N 1°	HA	133.88	31.26	165.14	1.05	260.00	45083.22
		Ladrillos	159228.78	20943.54	180172.32	1.05	0.24	45403.42
		Mortero	10141.59	2491.56	12633.15	1.10	0.21	2918.26
	N 2° - 9°	HA	968.67	250.35	1219.02	1.05	260.00	332792.46
		Ladrillos	1176876.00	183590.55	1360466.55	1.05	0.24	342837.57
		Mortero	141527.27	21840.94	163368.21	1.10	0.21	37738.06
		CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
		CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
	Azotea	HA	74.57	60.92	135.49	1.05	260.00	36988.77
		Ladrillos	50729.35	1068.76	51798.11	1.05	0.24	13053.12
		Mortero	6094.05	127.15	6221.20	1.10	0.21	1437.10
		CLT 130mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
		CLT 90mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
Losas	Cimientos	HA	446.92	0.80	447.72	1.05	260.00	122227.56
	Cisterna	HA	56.33	23.91	80.24	1.05	260.00	21905.52
	S 03 - 01	HA	734.31	65.05	799.36	1.05	260.00	218225.28
	N 1°	HA	168.66	23.35	192.01	1.05	260.00	52418.73
	N 2° - 9°	HA	1327.51	130.57	1458.08	1.05	260.00	398055.84
		HL 50mm	0.00	0.00	0.00	1.05	275.84	0.00
		CLT 160mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
	Azotea	HA	97.11	0.00	97.11	1.05	260.00	26511.03
		HL 50mm	0.00	0.00	0.00	1.05	275.84	0.00
		CLT 160mm	0.00	0.00	0.00	1.10	-707.90	0.00
Terminaciones	Cisterna	Mortero	17915.64	2142.37	20058.01	1.10	0.21	4633.40
	S 03 - 01	Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
	N 1°	Mortero	61087.51	35102.28	96189.79	1.10	0.21	22219.84
	N 2° - 9°	Mortero	553816.74	301103.74	854920.48	1.10	0.21	197486.63
		Madera	0.00	0.00	0.00	1.10	-715.43	0.00
		Tyvex	0.00	0.00	0.00	1.10	0.55	0.00
		Volcoglass	0.00	0.00	0.00	1.15	3.20	0.00
	Azotea	Mortero	47624.09	39687.11	87311.20	1.10	0.21	20168.89
		Madera	0.00	0.00	0.00	1.10	-715.43	0.00
		Tyvex	0.00	0.00	0.00	1.10	0.55	0.00
Volcoglass		0.00	0.00	0.00	1.15	3.20	0.00	
							kg CO2 e	2210594.42
							Tn CO2 e	2210.59
							kg CO2 e/m2	234.75

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.

Proyecto de Construcción Industrializada en Madera

Tabla 5B

CIIT considerando el carbono biogénico en los modelos de edificio residencial (escenario 2).

Edificio residencial Híbrido en Hormigón Armado y Madera Contralaminada – erH (HA – CLT)									
ELEM.	NIVEL	MATERIAL	CANTIDAD DE MATERIAL			COEF. DESP.	COEF. INCORPORADO kg CO2e/m3 kg CO2e/m2 kg CO2e/kg	CIIT kg CO2e	
			m3 - m2 - kg						
Muros	Cimientos	HA	1.92	0.00	1.92	1.05	260.00	524.16	
		HA	56.33	0.00	56.33	1.05	260.00	15378.09	
	Cisterna	Ladrillos	8345.35	0.00	8345.35	1.05	0.24	2103.03	
		Mortero	992.81	0.00	992.81	1.10	0.21	229.34	
	S 03 - 01	HA	644.52	118.97	763.49	1.05	260.00	208432.77	
		Ladrillos	70461.34	4716.57	75177.91	1.05	0.24	18944.83	
		Mortero	8469.42	561.11	9030.53	1.10	0.21	2086.05	
	N 1°	HA	133.88	31.26	165.14	1.05	260.00	45083.22	
		Ladrillos	159228.78	20943.54	180172.32	1.05	0.24	45403.42	
		Mortero	10141.59	2491.56	12633.15	1.10	0.21	2918.26	
	N 2° - 9°	HA	0.00	250.35	250.35	1.05	260.00	68345.55	
		Ladrillos	0.00	183590.55	183590.55	1.05	0.24	46264.82	
		Mortero	0.00	21840.94	21840.94	1.10	0.21	5045.26	
		CLT 130mm	864.55	0.00	864.55	1.10	-707.90	-673216.44	
		CLT 90mm	412.17	0.00	412.17	1.10	-707.90	-320952.66	
	Azotea	HA	0.00	60.92	60.92	1.05	260.00	16631.16	
		Ladrillos	0.00	1068.76	1068.76	1.05	0.24	269.33	
		Mortero	0.00	127.15	127.15	1.10	0.21	29.37	
CLT 130mm		77.26	0.00	77.26	1.10	-707.90	-60161.59		
CLT 90mm		39.01	0.00	39.01	1.10	-707.90	-30376.70		
Losas	Cimientos	HA	446.92	0.80	447.72	1.05	260.00	122227.56	
		HA	56.33	23.91	80.24	1.05	260.00	21905.52	
	S 03 - 01	HA	734.31	65.05	799.36	1.05	260.00	218225.28	
	N 1°	HA	168.66	23.35	192.01	1.05	260.00	52418.73	
	N 2° - 9°	HA	0.00	130.57	130.57	1.05	260.00	35645.61	
		HL 50mm	410.01	0.00	410.01	1.05	275.84	118752.02	
		CLT 160mm	1103.75	0.00	1103.75	1.10	-707.90	-859479.09	
	Azotea	HA	0.00	0.00	0.00	1.05	260.00	0.00	
		HL 50mm	2.14	0.00	2.14	1.05	275.84	619.81	
		CLT 160mm	122.38	0.00	122.38	1.10	-707.90	-95296.08	
	Terminaciones	Cisterna	Mortero	17915.64	2142.37	20058.01	1.10	0.21	4633.40
			Mortero	79238.08	10768.20	90006.28	1.10	0.21	20791.45
N 1°		Mortero	61087.51	35102.28	96189.79	1.10	0.21	22219.84	
N 2° - 9°		Mortero	0.00	301103.74	301103.74	1.10	0.21	69554.96	
		Madera	0.62	0.00	0.62	1.10	-715.43	-487.92	
		Tyvex	1600.89	0.00	1600.89	1.10	0.55	968.54	
		Volcoglass	1600.89	0.00	1600.89	1.15	3.20	5891.28	
Azotea		Mortero	0.00	39687.11	39687.11	1.10	0.21	9167.72	
		Madera	0.01	0.00	0.01	1.10	-715.43	-7.87	
		Tyvex	31.28	0.00	31.28	1.10	0.55	18.92	
	Volcoglass	31.28	0.00	31.28	1.15	3.20	115.11		
							kg CO2 e	-859133.93	
							Tn CO2 e	-859.13	
							kg CO2 e/m2	-91.23	

Nota. Elaborado por L. Carbajal, 2025.