

Análisis de la Huella de Carbono de la Construcción de una Vivienda de Madera Tradicional y una Vivienda de Madera Masiva para el Centro - Sur de Chile.

Estudiante: María Catalina Venezian Juricic

Profesor guía: Gabriel Felmer

Resumen

En Chile, se estima que el sector de la edificación es responsable de más de un tercio del total de las emisiones de gases de efecto invernadero, representando una de las actividades productivas con mayores desafíos para alcanzar la descarbonización del país al año 2050. A partir de estudios de ciclo de vida se ha potenciado la aplicación de la madera masiva como sistema estructural para viviendas en altura, principalmente en base a sus propiedades estructurales y las bajas emisiones de carbono que conlleva su utilización. Sin embargo, aún no existe claridad sobre los impactos ambientales asociados a la producción de viviendas de baja escala en madera masiva. Este artículo presenta los resultados de la modelación de la huella de carbono de una vivienda aislada en entramado liviano tradicional de madera y una proyección equivalente de esta misma en madera masiva. Dentro de los hallazgos encontrados se destaca que el carbono emitido por los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de ambas tipologías difiere en 2.519,69 KgCO_{2eq} siendo superior en la vivienda de madera masiva. Por otra parte, se estima que la absorción de carbono por parte de la vivienda en madera masiva alcanza por sobre el doble en comparación a la vivienda tradicional, almacenando -39.576,66 KgCO_{2eq} en contraste con los -18.528,08 KgCO_{2eq} alcanzados por la vivienda de entramado.

Palabras clave: Huella de carbono, Análisis ciclo de vida, Madera masiva, Entramado liviano tradicional, Vivienda unifamiliar aislada.

1. Introducción

Se estima que el sector de la edificación es responsable de alrededor de un 36% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del planeta (Global ABC, 2021). Del total de estas, cerca de un 11% provienen de los procesos de extracción, producción y transporte de materiales de construcción (IEA, 2018). Con el objetivo de contribuir a la descarbonización del sector, se ha potenciado la innovación para sustituir la aplicación de materiales de uso convencional como el hormigón y el acero (De la Fuente, 2019).

Una de las principales propiedades que se busca alcanzar con los nuevos materiales, corresponde a la minimización del carbono incorporado y la producción en base a recursos renovables y sustentables (Zhikang, 2019). Uno de los materiales con amplia aceptación por parte de profesionales del sector, presentando una utilización sostenida durante los últimos veinte años, corresponde a la madera masiva, principalmente la madera contralaminada y laminada encolada (Lechon, 2021). Una de las razones

fundamentales de esto, es la condición y capacidad natural de la madera de secuestrar y almacenar carbono a lo largo de todo su ciclo de vida (Oliver et al, 2014). Además, la madera masiva, en contraposición a sistemas tradicionales de madera, permite la edificación de estructuras de mayor altura y complejidad, en base a la mejora de sus propiedades mecánicas y estructurales (Harte, 2017).

La madera masiva se ha consolidado en países desarrollados de Norte América y Europa como sistema estructural de edificaciones residenciales en altura (CORMA, 2021), respaldándose en diversos estudios de emisiones de ciclo de vida de estructuras que cuentan con una mayor elevación. Sin embargo, aún no hay suficiente claridad sobre el carbono emitido al aplicar la madera masiva en construcciones unifamiliares de baja escala. Esto causa preocupación, particularmente en regiones donde su uso es significativo, ante una eventual masificación en viviendas sin antes comprobar numéricamente el carbono asociado a su ciclo de vida.

En Chile, la madera es el material más utilizado para la construcción de viviendas unifamiliares de hasta

dos pisos (Banco Mundial, 2020). Se estima que cerca de un 56% de la construcción de viviendas de estas características en todo el país, fueron construidas en madera (INE, 2020). Sin embargo, en la zona Centro - Sur, esta proporción aumenta entre un 84% y 89% del total de las nuevas construcciones. Durante el año 2020 la IX Región de La Araucanía contó con el mayor porcentaje (89%) de nuevas edificaciones construidas en madera (INE, 2020). Estableciendo una relación directa con la superficie de plantaciones forestales de la región, la cual, al presente, cuenta con más de 488 mil hectáreas, representando alrededor de un 21% del total forestal del país (INFOR, 2021).

A pesar de contar con una importante superficie de plantaciones a lo largo del territorio nacional, las que actúan como sumideros naturales de carbono, Chile aún enfrenta el desafío de la reducción de las emisiones para el año 2030 y la carbono neutralidad para el año 2050 (CEPAL /OCDE, 2016) (Acuerdo de París, 2015). Una de las posibilidades para alcanzar esta meta corresponde al incentivo de la construcción responsable y sustentable en madera, sustituyendo sistemas convencionales como el hormigón y el acero, dado que sus procesos de producción y manufactura conllevan una alta emisión de carbono en comparación a la producción de la madera.

Ahora bien, bajo el entendido que la mayor producción de viviendas unifamiliares aisladas de hasta dos pisos es en madera, en esta investigación se propuso evaluar, mediante el análisis de ciclo de vida, el ahorro de carbono asociado a ambos sistemas constructivos, entramado liviano tradicional y madera masiva. Se propone estudiar la evidencia de un sistema estructural con mayor potencial para mitigar el cambio climático, en base a un menor índice de emisiones de carbono. A raíz de esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Se emite una mayor o menor cantidad de carbono durante los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de una vivienda aislada en entramado liviano tradicional en comparación a una potencial vivienda equivalente en madera masiva?

Hipótesis de la investigación

Si bien las emisiones de carbono asociadas a los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de viviendas de entramado liviano son menores a las de viviendas equivalentes en madera masiva, se espera que, al considerar las emisiones netas de dichas etapas, el carbono secuestrado sería superior en las viviendas de madera masiva.

Objetivo general de la investigación

Medir la huella de carbono de una vivienda de entramado liviano tradicional ubicada en la IX región de La Araucanía en Chile y comparar los resultados con las emisiones potenciales estimadas para una vivienda equivalente proyectada en madera masiva.

Objetivos específicos de la investigación

1. Evaluar el impacto ambiental de los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de viviendas en madera masiva en el territorio nacional.
2. Medir las emisiones de carbono contenido en los materiales requeridos para la construcción de ambas tipologías de viviendas.
3. Estimar las emisiones netas de carbono de ambas tipologías de vivienda, al calcular el almacenamiento de carbono respectivo a las cuantías de madera.

2. Marco teórico

2.1 Huella de carbono

La huella de carbono es un concepto clave para identificar y medir el impacto ambiental asociado a la construcción. Se define como el conjunto de emisiones GEI producidas, directa o indirectamente, por los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de una vivienda (MMA, 2022). Corresponde a un indicador numérico, medido en kilogramos de carbono equivalente ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}$), considerando la emisión de los principales GEI liberados a la atmósfera (Green Peace, 2020).

De esta manera, permite informar sobre las fases que conllevan una mayor emisión de carbono, otorgando la posibilidad de optimizar aquellos procesos, a través del uso eficiente de los recursos energéticos y de materia prima (MMA, 2022). Por otro lado, posibilita fomentar, tanto en las industrias, como en posibles consumidores, la responsabilidad y compromiso con el desarrollo económico y social sustentable (PANCC, 2017).

Si bien, durante los procesos necesarios para la construcción de una vivienda se emite carbono a la atmósfera, existen sistemas a través de los cuales se secuestra carbono de esta. Dichos sistemas, conocidos como sumideros de carbono, son aquellos depósitos naturales que asimilan y acumulan carbono mediante la fotosíntesis consumada por algas marinas, árboles y plantas (Parlamento Europeo, 2019). Por consiguiente, los principales depósitos de

carbono del planeta están compuestos por los océanos y bosques, tanto nativos como forestales (ONU, 2022).

Actualmente, se ha popularizado evaluar la huella de carbono de forma integral, tomando en cuenta la diferencia entre GEI emitidos y secuestrados (ONU, 2022). Este método, basado en contrarrestar las emisiones es conocido como *huella de carbono neta*. Mediante su cálculo es posible obtener dos resultados; en primer lugar, la *neutralidad de carbono*, el cual hace referencia al equilibrio en la sumatoria de carbono emitido y secuestrado, obteniendo cero emisiones totales (Parlamento Europeo, 2019). En segundo lugar, la *huella de carbono negativa*, representada por una mayor absorción de GEI a los emitidos a la atmósfera.

2.2 Análisis de ciclo de vida (ACV)

A partir de lo expuesto por el Ministerio del Medio Ambiente Chileno, se puede estimar la huella de carbono mediante la aplicación de seis métodos distintos, dependiendo del alcance y enfoque del estudio (MMA, 2022). Para medir la huella asociada a viviendas ha incrementado la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) (Wiche et al, 2020).

El ACV determina cuantitativamente el conjunto de los impactos ambientales asociado a la totalidad de la vida útil de una edificación (ISO 14040, 2006). El ACV suele denominarse "cradle to grave" (de la cuna a la tumba) (PAS 2050, 2008), dado que su estudio incluye: la fabricación y transporte de los materiales de construcción, el proceso constructivo, una extensa fase de uso y mantención del edificio, y la demolición y eliminación de los desechos. A lo largo

de este proceso se consumen recursos y se generan emisiones (World GBC, 2019).

La norma ISO propone subdividir la vida útil de los edificios en cinco etapas generales y consecutivas. Estas se especifican como: Producción (A1-A3); Construcción (A4-A5); Uso (B); Fin de vida (C); y Beneficios posteriores (D). Asimismo, cada una de estas etapas se detallan junto a sus respectivos procesos internos. (ISO 14044, 2006). La Tabla 1 al pie de página muestra la totalidad de etapas al aplicar un ACV completo, destacando las etapas consideradas por esta investigación (A1 - A5).

Conforme a la norma ISO, la estructura y metodología de un ACV está definida por una serie de fases secuenciales interrelacionadas entre sí (ISO 14040, 2006). Las cuatro fases corresponden a: la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario, el análisis del impacto, y la interpretación de los resultados (Hernández, 2019).

La primera fase, *objetivo y alcance*, corresponde a la definición de los límites del sistema, se especifican las etapas consideradas, la unidad funcional utilizada para medir los distintos indicadores ambientales y supone la vida útil propuesta para el edificio. Luego, en la fase de *análisis del inventario*, se realiza un listado de la información más relevantes de cada etapa del ciclo de vida de la vivienda. Considera información sobre materiales constructivos, transporte, construcción, operación, uso y mantención. Durante la fase de *análisis del impacto*, se evalúan los impactos ambientales asociados a los datos identificados en el inventario. Por último, la *interpretación de resultados* corresponde a una conclusión en base a los objetivos definidos en la evaluación inicial.

Producción (A1-A3)	Construcción (A4-A5)	Uso (B)	Fin de Vida (C)	Beneficios posteriores (D)
A1: Extracción materia prima	A4: Transporte y equipamiento	B1: Uso	C1: Deconstrucción y demolición	D1: Exporte de energía
A2: Transporte materia prima	A5: Construcción e instalación	B2: Mantención	C2: Transporte y equipamiento	D2: Reciclaje cerrado
A3: Manufactura producto		B3: Reparación	C3: Gestión de residuos	D3: Reciclaje abierto
		B4: Reemplazo	C4: Eliminación final	D4: Recuperación de energía
		B5: Renovación		D5: Re-uso
		B6: Uso de energía		

Tabla 1: Etapas análisis de ciclo de vida según normas ISO 14040 - 14044. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de un ACV se presentan en función de cada etapa del ciclo de vida. Describen los impactos ambientales mediante una variedad de indicadores específicos, incluyendo entre ellos el potencial de calentamiento global, consumo de energía, uso de recursos naturales, contaminación del aire y del agua, entre otros (Carbon LF, 2022).

2.4 Potencial de Calentamiento Global (GWP)

El Potencial de Calentamiento Global, conocido por su acrónimo en inglés GWP (Global Warming Potential) es uno de los indicadores concluidos por los estudios de ACV de una vivienda. Corresponde a la sumatoria total de los GEI causantes del agotamiento de la capa de ozono (Rotmans, 2009), emitidos durante la vida útil completa de una vivienda (CLF, 2022).

Los principales gases que se consideran en los estudios de GWP son los establecidos por el protocolo de Kioto en el año 1997 (Espíndola, 2011). Algunos de estos corresponden al dióxido de carbono (CO_2), del cual deriva la nomenclatura aplicada para medir este indicador ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC) y monóxido de carbono (CO), entre otros gases contaminantes (Rotmans, 2009).

2.3 Carbono incorporado

El carbono incorporado corresponde al resultado entregado por el indicador GWP. Representa todas las emisiones GEI generadas durante el ciclo de vida útil de una vivienda (Rivera, 2020). La mayoría de las emisiones de carbono incorporado se producen antes de la ocupación de los edificios. Están directamente relacionadas y de forma casi exclusiva a la extracción, producción y transporte de materiales de construcción (81,6%), como también, pero de menor manera, con los procesos constructivos de una vivienda (9,6%), etapas de uso (7,0%) y de fin de vida (1,8%) (Dulmage, 2018).

3. Metodología

La metodología aplicada en la investigación se limitó a la cuantificación de las emisiones de carbono asociadas a los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de dos tipologías de vivienda unifamiliar en madera: de entramado liviano en madera de pino radiata y una proyección equivalente en madera masiva. Sus emisiones fueron analizadas de forma comparativa, con el objetivo de identificar ventajas y desventajas respectivas a la aplicación de ambos sistemas constructivos. Como resultado de esto, se espera también, esclarecer

temas respectivos a la economía de recursos y emisiones netas de carbono y su importancia en la toma de decisiones para futuros proyectos.

3.1 Casos de estudio.

En primer lugar, se seleccionó un caso de estudio existente ubicado en el Parque Nacional Cerro Castillo, en la región de Aysén (Fig. 1 y 2). Este corresponde a una vivienda aislada unifamiliar de dos pisos, la cual cuenta con 150 m^2 de superficie útil construida. Su estructura principal está elaborada en madera de pino radiata, en base al sistema tradicional de entramado liviano (Fig. 3 y 5). La oficina de arquitectura y construcción encargada de la edificación de la vivienda, *Mekis Arquitectos*, facilitó información planimétrica, estructural, cubicación detallada e itemizado de obra.

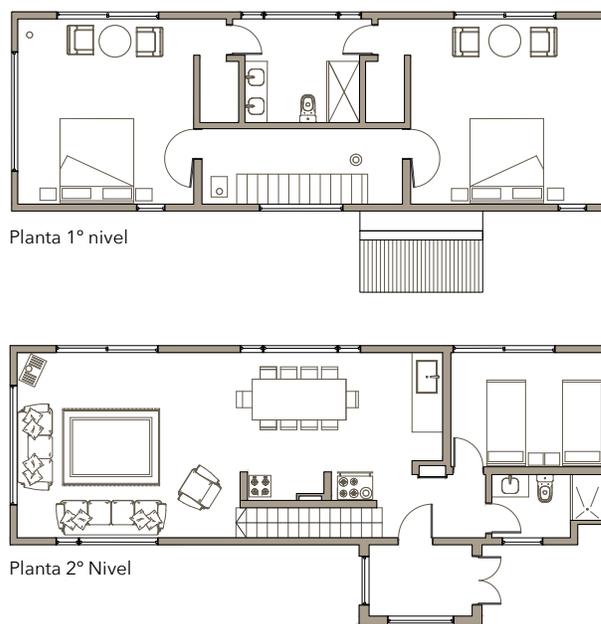


Fig. 1. Planimetría caso de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a planimetría original, 2022.



Fig. 2. Imagen referencial caso de estudio. Fuente: Mekis Arquitectos, 2022.

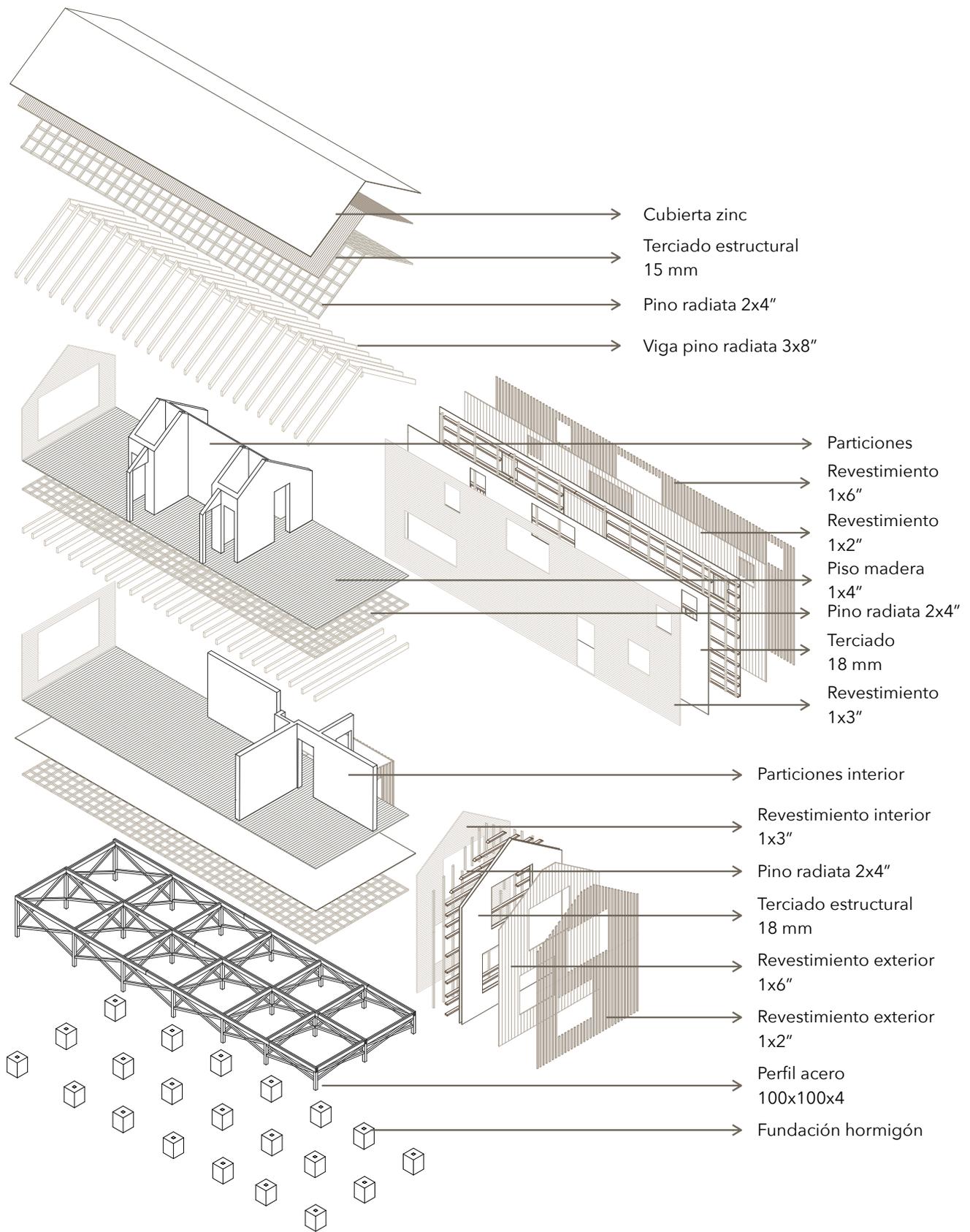


Fig. 3. Sistema constructivo vivienda entramado liviano tradicional. Fuente: Elaboraci3n propia.

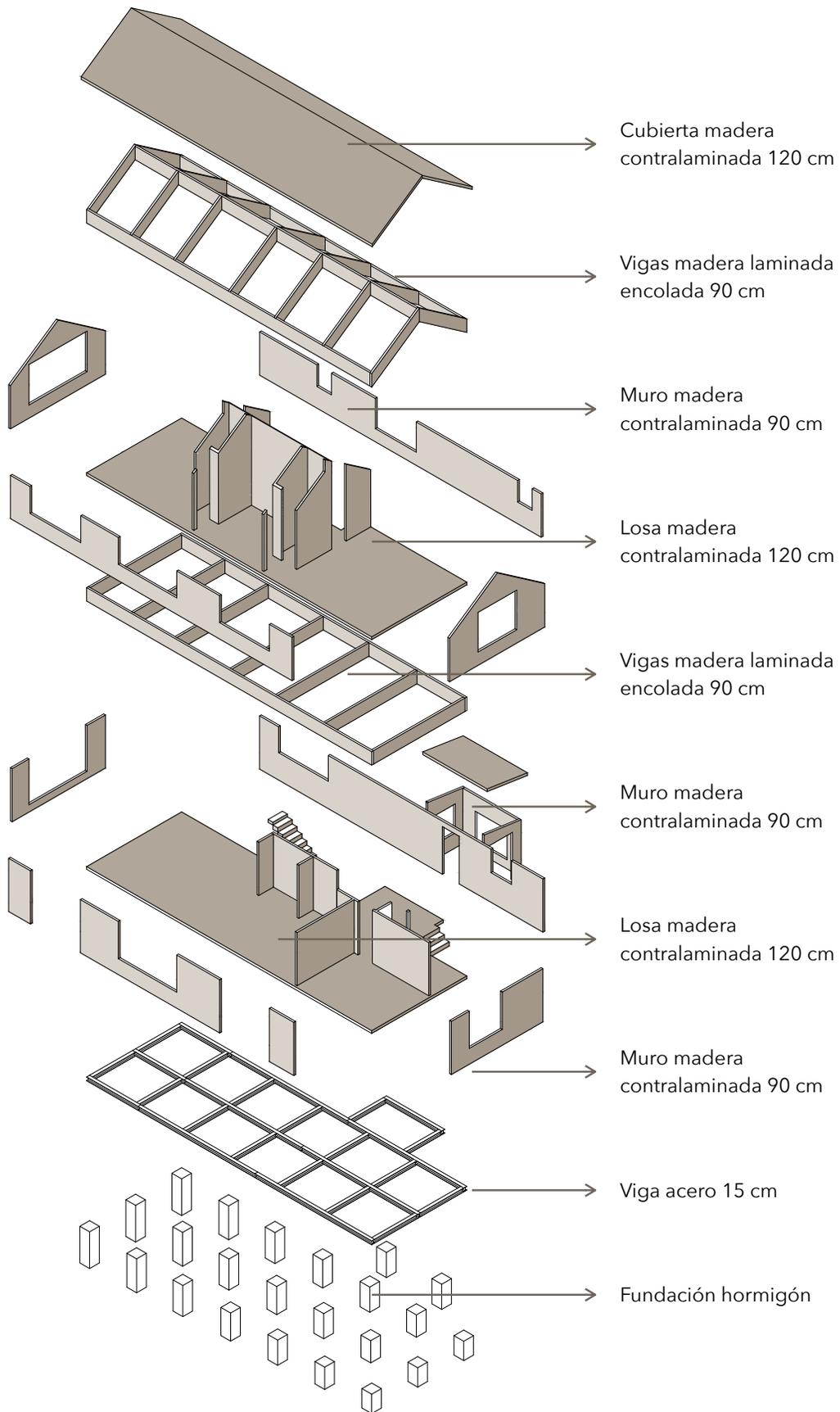


Fig. 4. Sistema constructivo vivienda proyectada en madera masiva. Fuente: Elaboración propia.

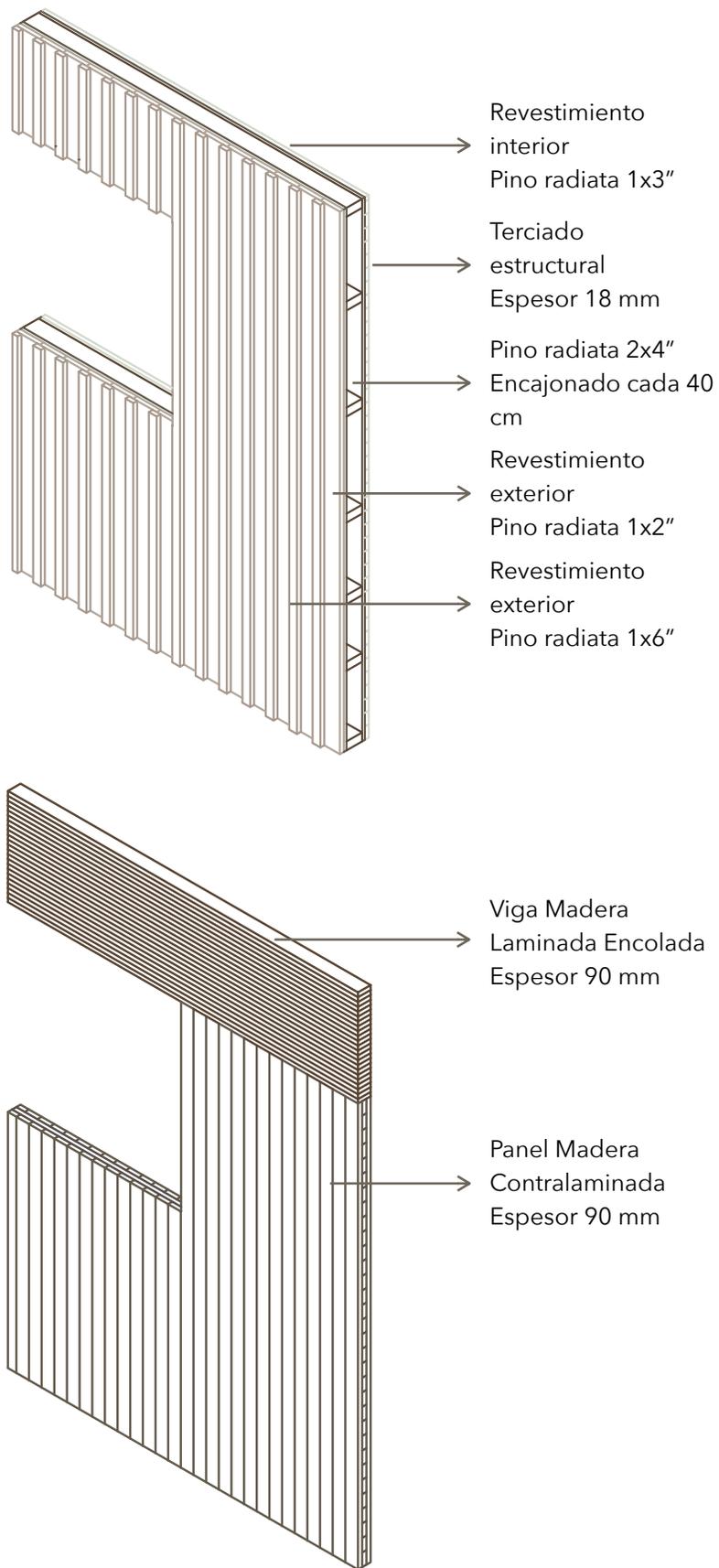


Fig. 5. Detalles constructivos, entramado liviano (superior) madera masiva (inferior). Fuente: Elaboración propia.

Debido a la complejidad y limitaciones de acceso al emplazamiento real del caso de estudio, se estableció un ajuste en su ubicación; se planteó la provincia de Villarrica en la IX región de La Araucanía como locación hipotética para la realización de la investigación. Este cambio proporciona una base más adecuada para abordar un estudio representativo a la realidad chilena. Además de justificar la proximidad con las plantaciones de pino radiata y la actual fábrica manufacturera de madera masiva en el territorio nacional.

A partir de la información proporcionada por la oficina a cargo de la construcción de la vivienda de entramado, se efectuó un inventario de los principales materiales requeridos para el cumplimiento de requisitos estructurales y por normativas de aislación acústica y térmica de la región en estudio. En dicho inventario se detallan los distintos materiales estudiados, sus dimensiones, densidades y cantidades específicas (Anexo 1.1). Además, los materiales fueron clasificados por categorías en base a los componentes a los cuales pertenecen, ya sean fundaciones, aislación, muros, cubiertas o losas.

En segundo lugar, se proyectó el diseño de una vivienda equivalente al caso de estudio (Fig. 4 y 5). Se reemplazó la aplicación del sistema estructural de entramado en madera de pino radiata, por el sistema de alta tecnología de madera masiva. Principalmente se utilizó paneles de madera contralaminada de tres y cinco capas. De acuerdo con la práctica común, la homologación se planteó con 90 mm de espesor (tres capas) para vigas y muros exteriores e interiores, y 120 mm de espesor (cinco capas) en losas y cubierta. Se estructuró con vigas de madera laminada encolada de 60 cm de alto y 90 mm de espesor el soporte de la losa del segundo piso de la vivienda y la cubierta de esta.

Para realizar los siguientes cambios estructurales y comprobación de estos, se contó con la asesoría de un arquitecto e ingeniero estructural de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile. En primer lugar, las fundaciones fueron modificadas en función de soportar el mayor peso, debido al mayor uso de madera en comparación con el caso de estudio. De este se mantuvo la aplicación de fundaciones aisladas de hormigón armado. Debido a la irregularidad del terreno y su condición natural de desnivel, se conservó la idea de la separación entre la vivienda y el suelo. La elevación de la vivienda permitió tanto la ventilación como el paso del agua por la separación. La vivienda equivalente se proyecta soportada por vigas de acero de 150

mm de altura, las cuales son apoyadas en las fundaciones de hormigón. Estas últimas aumentan respectivamente su altura hasta alcanzar la posición horizontal de las vigas de acero.

La homologación del caso de estudio con la vivienda proyectada en madera masiva se realiza con el objetivo que, al comparar las emisiones asociadas a ambas tipologías, estas sean semejantes en espacios, forma, geometría y cumplimiento normativo. Permitiendo obtener resultados objetivos para dos viviendas equivalentes pero construidas a partir de sistemas diferentes.

Por último, se efectuó un inventario con los potenciales materiales de carácter estructural necesarios y requeridos para el cumplimiento normativo de aislación térmica y acústica, que compondrían a la vivienda equivalente en madera masiva (Anexo 1.2).

3.2 Criterios de modelación ACV

La investigación aplicó el método para el cálculo del análisis de ciclo de vida conforme a la norma internacional ISO 14041 y 14044 (ISO, 2006). Debido a la carencia de datos, fuentes y referencias específicas para la región de la Araucanía y/o Chile, el estudio se limitó a abordar los procesos detallados por las etapas denominadas producción (A1 - A3) y construcción (A4 - A5) (ISO 14040-14044, 2006). El estudio del ACV determinó la totalidad del impacto medioambiental asociado a los procesos mencionados, medido en $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$, establecido por el indicador *Potencial de Calentamiento Global* (GWP).

La investigación consideró como fuente de información principal el ampliamente reconocido software internacional de libre acceso, desarrollado por el Instituto Athena (Athena Sustainable Materials Institute). Se utilizó la versión 5.4. del software *Athena Impact Estimator for Buildings* (2022). Dado que el programa entrega los resultados detallados en base a fuentes de datos locales para distintas regiones de Estados Unidos y Canadá (Athena SMI, 2022), los resultados fueron reinterpretados en función de adaptarlos al contexto nacional. El principal ajuste realizado corresponde a la información entregada por los procesos de transporte de materia prima (A2) y transporte de materiales de construcción (A4). Aquellos resultados desarrollados por el software para dichas etapas no son considerados por este estudio. Sin embargo, se desarrolla una estimación de recorridos esperados, basados en locaciones pertinentes a ambos casos de estudio.

La recopilación de datos y referencias aplicadas para el análisis de cada etapa estudiada son descritas a

continuación. En el anexo 2 y 3 se muestran esquemáticamente los procesos más representativos de cada etapa del ACV junto al plano de ubicación.

Producción A1 - A3

Extracción materia prima (A1): En primer lugar, se asumió que la madera destinada para la vivienda de entramado liviano fue extraída de la provincia de Villarrica en la región de La Araucanía (Punto 1 del anexo 2). En segundo lugar, la madera de pino radiata pretendida para la proyección en madera masiva se asumió que fue adquirida en la provincia de Los Ángeles, en la región del Biobío (Punto 1 del anexo 3) debido a la proximidad con la planta manufacturera de madera masiva, Niuform de CMPC.

Para la cuantía de los materiales requeridos por la vivienda de entramado liviano se utilizó el itemizado de obra, entregado por la oficina encargada de la construcción de la vivienda. A partir de estos datos, se clasificó la información en categorías y se especificó diversos aspectos respectivos a cada material (Anexo 1.1). Para la vivienda equivalente en madera masiva se estimó la potencial cuantía de materiales a partir de la reinterpretación de la planimetría de la vivienda original con ayuda de un detallado modelo tridimensional de elaboración propia. La sustitución del sistema estructural fue asistida por un arquitecto e ingeniero de la Universidad de Chile, de modo de asegurar la correcta resistencia. Finalmente, se planteó un listado con los posibles materiales necesarios para la construcción de dicha vivienda, especificando aspectos como cantidad (m^3), peso (kg) y densidad (m^3/kg) respectivo a cada material (Anexo 1.2). Se obvió materiales requeridos por ambas tipologías de vivienda, bajo el entendido que supondrían un mismo valor total de emisiones agregadas.

Para ambos casos se evaluaron las emisiones a partir de la aplicación del software Athena 2022 v.5.4. Para esto, se crearon dos nuevos proyectos al iniciar el programa. Se especificó la superficie útil total de las viviendas ($150 m^2$ ambas), altura máxima (7 metros), tipo de proyecto (vivienda unifamiliar aislada), duración considerada (50 años) y ubicación (Estados Unidos). Dado que el software carece de fuentes de datos locales chilenas se recomendó utilizar el indicador general para Estados Unidos, ya que proporciona información promedio del país, en vez de datos específicos para cierta localidad (Athena SMI, 2022). Una vez creados los nuevos proyectos y detallada la información solicitada, se ingresaron al programa los inventarios de materiales respectivos a cada vivienda. Estos debieron ser previamente

traducidos al inglés de modo que el software los trabaje de manera automática.

Transporte materia prima (A2): Se refiere al desplazamiento de la madera trozada desde las plantaciones taladas hasta los respectivos aserraderos. Para ambos casos se supuso el uso de un camión de carga diésel de capacidad 9 toneladas y rendimiento de $6km/l$ cargado y $10km/l$ vacío. Se consideró el traslado de ida con el camión cargado y de regreso descargado. Para ambos casos se asumió que el traslado de todo el material fue efectuado por un único camión de carga forestal.

Para el caso de estudio original se estimó un recorrido de $18,6 km$ por autopistas principales desde una plantación de pino radiata (Punto 1 del anexo 2) hasta un aserradero industrial existente ubicado en la región de La Araucanía (Punto 2 del anexo 2). Por otro lado, para la vivienda proyectada, se asumió un recorrido de $13,8 km$ desde una plantación de pino radiata (Punto 1 del anexo 3) hasta un aserradero industrial existente (Punto 2 del anexo 3). Posteriormente, la madera aserrada, se trasladó hasta Niuform de CMPC (Punto 3 anexo 3), se estimó el recorrido en $21,1 km$.

Para los recorridos se midió el carbono aplicando el método del consumo de combustible en función de los kilómetros recorridos (Bórquez, 2017). El grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, creado por la OMM y la ONU) definió $2,69 KgCO_{2eq}$ por litro de combustible quemado como referencia estándar para las emisiones asociadas a camiones de carga diésel. La locación de aserraderos industriales existentes y operantes en el territorio nacional para el año 2021 se mapeó a partir de la base de datos desarrollada por el Instituto Forestal (INFOR, 2021), corporación adscrita al Ministerio de Agricultura Chileno.

Manufactura de productos (A3): En el aserradero, la madera trozada es evaluada para aislar aquella que se determine defectuosa debido a nudos, pudrición o agrietamiento. La madera que cumple con las formalidades solicitadas es humedecida constantemente. Se asegura el aprovechamiento de cada tronco según sus dimensiones respectivas. Luego, se procede al aserrado de la madera, actividad correspondiente al despiece longitudinal y transversal, en base a las clasificaciones previas, confirmando un ancho y largo definitivo a cada tablón. La madera aserrada procede a las cámaras de secado para obtener el grado de humedad especificado por la normativa chilena de la construcción, posteriormente se eliminan irregularidades e imperfecciones mediante el cepillado final.

Por un lado, la madera solicitada para la construcción de la vivienda de entramado liviano es trasladada al sitio de la obra. Por otro lado, la madera que debe ser procesada para convertirse en paneles de madera contralaminada y vigas de madera laminada encolada es trasladada a la fábrica de madera masiva (Niuform CMPC).

A esta última, una vez ingresada a Niuform de CMPC, se le verifica su contenido de humedad y capacidad estructural. Se procede a la unión de ciertos tablonces a través del sistema finger joint, mediante la aplicación de adhesivo y prensados hasta formar largas tablas individuales. Por otro lado, una máquina realiza trozados transversales, obteniendo las distintas dimensiones necesarias para la formación de los paneles rectangulares de madera contralaminada. Luego, se disponen los tablonces dimensionados, uno al lado del otro, minimizando los espacios entre ellos. Se aplica una capa de adhesivo sobre las tablas, para luego apilar una nueva capa de tablonces de madera en dirección perpendicular a la primera. Posteriormente son prensados hidráulicamente. Este proceso (madera - adhesivo - madera - prensa) se repite hasta conseguir la totalidad de capas requeridas por cada proyecto, en este caso en específico se proyectan espesores de tres y cinco capas (90 mm y 120 mm respectivamente). Finalmente, se utiliza el diseño digital junto a la máquina CNC para la perforación de los paneles. La madera masiva debe pasar por todos los sistemas de comprobación estructural, de humedad y resistencia al fuego y del adhesivo, previo al embalaje y distribución del producto.

Para la estimación de las emisiones asociadas a la manufactura de los productos requeridos por ambos sistemas constructivos, se utilizó el software Athena 2022 v.5.4.

Construcción A4 - A5

Transporte producto y equipamiento (A4): Como se mencionó anteriormente, en el caso de la madera destinada para el caso de estudio original, esta es distribuida desde el aserradero hasta el sitio de la obra. Recorrido estimado en 33,2 km (Punto 3 anexo 2). Por otro lado, en el caso de la madera masiva, debe ser trasladada desde la fábrica en el Biobío hasta el sitio de la obra en La Araucanía, recorrido estimado en 267 km (anexo 4). En ambos casos se aplicó el método mencionado en el punto de *transporte de materia prima (A2)*.

Construcción e instalación (A5): Alude a las emisiones generadas a lo largo de todo el proceso de construcción e instalación de ambas tipologías de

vivienda hasta ser finalizadas. Considera la emisión asociada a maquinarias y herramientas requeridas en el trabajo de obra. Para su cálculo se aplicó el software mencionado en las etapas de *extracción de materia prima (A1)* y *manufactura de productos (A3)*.

A modo de síntesis, la metodología aplicada en la presente investigación se basó en los criterios expuestos por la norma ISO 14040 y 14044 (2006). Se requirió el uso del software desarrollado por el Instituto Athena (Athena SMI, 2022) para las etapas de extracción de materia prima (A1), manufactura de productos (A3) y construcción e instalación (A5). Por otro lado, para las etapas de transporte de materia prima y de productos (A2 y A4) se utilizó el método del cálculo del combustible quemado mediante los desplazamientos de ida y regreso de los camiones diésel de carga pesada, desarrollado por el IPCC.

4. Resultados

A lo largo de esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación. En primer lugar, se realizó un análisis comparativo de las cuantías de los materiales principales requeridos por ambos sistemas constructivos, en base a los inventarios desarrollados por este trabajo (Anexo 1). En segundo lugar, se interpretaron las emisiones de carbono asociadas a los distintos componentes que conforman a las viviendas. Por último, se presentan los resultados obtenidos por cada etapa, es decir, el conjunto de emisiones GEI asociadas al ciclo de vida de ambas viviendas.

4.1 Cuantificación de materiales

Como se muestra en la tabla 2, ambas tipologías constructivas utilizan la madera como material principal, constituyendo esta el mayor porcentaje para la edificación de ambas estructuras. La madera representa por sobre la mitad de los materiales requeridos para la construcción de ambos casos, siendo un 53% del total en la vivienda de entramado y un 64% para la vivienda en madera masiva. Sin embargo, se establece un claro incremento en la utilización de esta, en términos de volumen (m³) y por consiguiente de peso (kg), para la construcción de la vivienda en madera masiva. Se entiende que estos difieren de manera significativa dado el proceso de manufactura que conllevan los paneles y vigas de madera contralaminada. Estos últimos efectivamente requieren de una mayor aglomeración de tablonces de madera aserrada para constituir paneles estructurales, ya sean muros, losas o cubierta, en comparación a los requeridos para edificar estructuras de entramado liviano de características similares.

En términos numéricos esta diferencia volumétrica se traduce a la utilización del doble de madera por la vivienda proyectada en madera masiva en contraste al caso de estudio. Ahora bien, se debe especificar que de los 38,64 m³ de madera utilizada por la vivienda de entramado liviano, únicamente alrededor de un 40% de estos son requeridos como material de soporte estructural, el resto corresponde a revestimiento de muros interiores, exteriores, de pisos, y cubiertas.

El hormigón armado es empleado únicamente para las fundaciones aisladas de ambas viviendas. Es importante distinguir que el volumen de este planteado para la vivienda en madera masiva difiere de manera sustancial al compararlo con el utilizado por el caso de estudio. La vivienda de entramado dispone de un 53% menos de hormigón, debido principalmente al aumento del peso total de la vivienda proyectada en madera masiva. Esto por el incremento en la utilización de madera dado el tipo de sistema estructural. Esta disparidad se origina por los requerimientos estructurales, de resistencia, y de soporte, que cumplen las fundaciones de viviendas.

En relación con esto y contrario a lo esperado, el acero empleado por ambas viviendas no presenta un cambio sustancial en contraste con la diferencia mencionada para el hormigón. El acero, utilizado como estructura complementaria para las fundaciones, difiere en aproximadamente 0,1 metro cúbico. Es decir, el caso de estudio original requiere de 0,3 m³ mientras que para la proyección en madera masiva se asume un volumen de 0,2 m³ de acero requerido para soportar los pesos de las viviendas.

Por último, se debe hacer una distinción entre el poliestireno expandido empleado por ambas viviendas. Aquella de entramado liviano utilizó sobre un 78% más de poliestireno en contraste con la vivienda proyectada en madera masiva. La razón principal de que divergen considerablemente está dada por las características otorgadas por el tratamiento, manufactura y terminaciones de los paneles de madera contralaminada, los cuales precisan una menor cantidad de aislantes adicionales.

En la tabla 2 se presenta de forma sintética la cuantía total de materiales requeridos por ambas tipologías constructivas en madera. Los porcentajes corresponden a la suma del conjunto total de cada material, sin diferenciar los diferentes componentes a los que pertenecen. Se comparan las cuantías de materiales de ambas viviendas en función de su volumen y peso, para así distinguir cualidades propias a cada material.

Vivienda Entramado Liviano Material	Porcentaje del volumen total	Porcentaje del peso total
Pino Radiata	52,51 %	83,98 %
Poliestireno	16,81 %	0,19 %
Terciado Estructural	14,25 %	0,81 %
Hormigón	5,75 %	4,16 %
Volcanita Acustica	5,18 %	0,05 %
Fieltro	2,44 %	0,01 %
Zinc	2,44 %	0,01 %
Acero	0,62 %	11,78 %

Vivienda Madera Masiva Material	Porcentaje del volumen total	Porcentaje del peso total
Madera Contralaminada	63,58 %	46,86 %
Madera Laminada	10,30 %	7,60 %
Hormigón	9,70 %	35,01 %
Pino Radiata	9,25 %	6,52 %
Poliestireno	3,86 %	0,06 %
Acero	3,30 %	3,94 %

Tabla 2. Cuantía total de materiales en función de volúmenes y peso. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Emisiones por componente

A partir de la aplicación del software se obtuvo los resultados para el indicador GWP. Estos son presentados en función de la superficie útil construida de ambas viviendas. Se indican en KgCO_{2eq}/m² construido. Ambas tipologías suponen una superficie total de 150 m², por lo que los resultados obtenidos son divididos en dicha área.

Para ambos casos el componente denominado *fundaciones*, está representado por el conjunto de cuantías de hormigón y acero, respectivo a cada vivienda. El componente clasificado como *aislación* representa para ambas viviendas el poliestireno expandido, sin embargo, para la vivienda de entramado este considera también el aislante acústico utilizado (volcanita). En el caso de los componentes denominados *losas, cubierta y muros*, incluyendo particiones y muros exteriores, en la vivienda tradicional se considera las cuantías de madera de pino radiata, terciado estructural, fieltro y zinc en la cubierta. En cambio, para la vivienda proyectada en madera masiva dichos componentes se conforman exclusivamente a partir de paneles de madera contralaminada y madera laminada.

Vivienda Entramado Liviano.

Vivienda Madera Masiva.

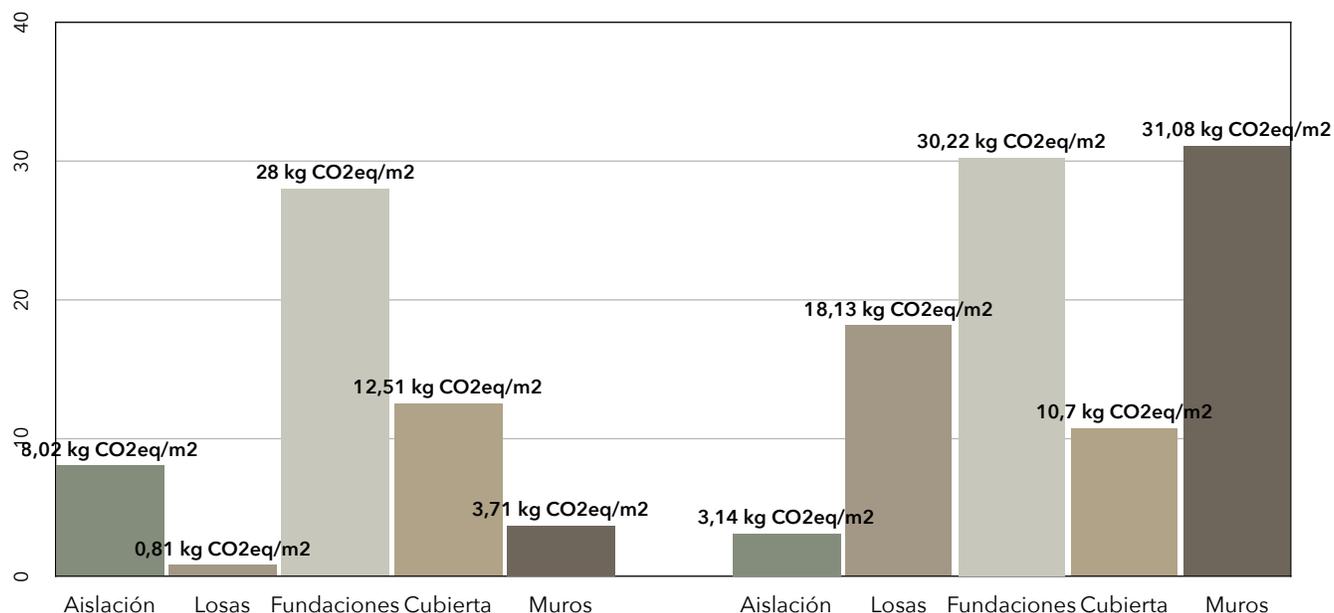


Fig. 6. Gráfico de emisiones asociadas a los componentes de ambas viviendas. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico superior, se especifica cuantitativamente el conjunto de emisiones en términos de $\text{KgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ para los diferentes componentes de ambas tipologías de vivienda. A partir de estos resultados, se estima que la suma total del carbono equivalente emitido por la vivienda original de entramado alcanza un total de 6.240,77 $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$, en comparación a los 8.760,46 $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$ estimados para la vivienda proyectada en madera masiva. Ahora bien, a pesar que esta última supone una diferencia del 29% sobre las emisiones asociadas a la vivienda tradicional, en ambas tipologías constructivas se aprecia una clara tendencia al incremento de las emisiones específicamente por el componente denominado *fundaciones*. Como se mencionó, este considera las cuantías volumétricas del hormigón y acero respectivo a cada tipología de vivienda. Demostrando evidentemente el alto impacto ambiental generado por aquellos materiales de uso convencional mencionados.

Surgen diferencias fundamentales en cuanto a las emisiones de carbono asociadas a los componentes designados *losas* y *muros*. Esto se debe principalmente al proceso de manufactura que conlleva la elaboración de los paneles de madera contralaminada y vigas de madera laminada encolada. Como se mencionó anteriormente, la madera masiva requiere de un proceso adicional posterior a la

elaboración de la madera aserrada, por lo que naturalmente las emisiones generadas por la producción de madera masiva se elevan. En términos numéricos y comparativos, la diferencia que suponen las emisiones asociadas a la extracción, producción y construcción de las *losas* corresponde a un 96% superior para la vivienda proyectada en madera masiva. En cuanto al componente definido como *muros*, la madera masiva supera a la vivienda original en un 88%. Finalmente, y contrario a lo esperado, el componente clasificado *cubiertas* alcanzó en la vivienda tradicional un mayor número total de emisiones. Si bien, comparativamente es una diferencia leve de únicamente un 15% superior, esto supone un significativo aumento de las emisiones exclusivamente por los procesos de elaboración del fieltro y zinc utilizados en la cubierta de la vivienda de entramado, los cuales no suponen un requerimiento por la vivienda homologada.

De igual forma, el gráfico muestra los resultados obtenidos por los componentes denominados *aislación*. Debido a que la vivienda de entramado liviano utiliza además del poliestireno expandido, un aislante acústico (volcanita acústica), el cual no es considerado como material requerido por la vivienda de madera masiva, estos difieren en que se emite un 61% más de carbono por la vivienda de entramado liviano en comparación con el emitido por la vivienda homologada.

4.3 Emisiones por etapas

A lo largo de esta sección se presentan los resultados obtenidos por las distintas etapas del ciclo de vida estudiadas. Se exponen de forma paralela los datos proporcionados mediante la aplicación del software para las etapas A1, A3 y A5, como los resultados obtenidos a través del cálculo de las emisiones asociadas a los distintos transportes (etapas A2 y A4). Todos los resultados son expresados en kilogramos de carbono equivalente ($\text{KgCO}_{2\text{eq}}$), el cual considera las emisiones de todos los GEI generados durante los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de ambas tipologías de vivienda. A pesar que el software genera los datos en función de las distintas etapas del ciclo de vida, este no especifica distintivamente las emisiones de los procesos de extracción y producción de los materiales de forma aislada, es decir, entrega un resultado común para el total de carbono emitido por dichos procesos (A1 y A3).

Transporte A2 - A4

El desarrollo del cálculo realizado para la cuantía de las emisiones generadas mediante los transportes requeridos para la construcción de ambas tipologías de vivienda es expuesto en las Tablas 7.1 y 7.2 del anexo 7. A continuación, se desprenden de forma sintética los resultados obtenidos mediante dicho cálculo. Por un lado, se estimó un total de 37,16 $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$ emitidos por los 103,6 km recorridos considerados necesarios por la vivienda de entramado liviano original, en comparación a los 216,56 $\text{KgCO}_{2\text{eq}}$ emitidos mediante el recorrido de 603,8 km estimados por la vivienda proyectada en madera masiva. Como se observa en estos datos, el resultado obtenido para las etapas de transporte es significativamente mayor en la vivienda de madera masiva. Esto se justifica en la necesidad de suponer un recorrido más extenso que la vivienda de entramado, debido a que la ubicación de la fábrica de madera masiva y el emplazamiento propuesto para el caso de estudio se encuentran en distintas regiones. Se asume entonces, la necesidad de un recorrido adicional, generando una diferencia sustancial en los resultados obtenidos. En consecuencia, se demuestra una relación directa en la variación de las emisiones asociadas a los procesos de transporte en función de las distancias recorridas en términos de kilómetros desplazados.

Producción A1 - A3

Al analizar comparativamente las etapas de producción, se estimó un incremento del 29% del total de emisiones asociadas a la vivienda proyectada en

madera masiva en comparación a la vivienda tradicional de entramado. Dentro de las diferencias fundamentales al contrastar los datos obtenidos por ambas tipologías constructivas, se aprecia el efecto causado por las emisiones de los procesos agregados que debe cumplir la elaboración de la madera masiva. Se asume que el carbono emitido durante los procesos de tala de bosques y aserrado industrial es equivalente para ambos casos, sin embargo, se entiende que siempre pueden existir leves variaciones en estos. Por lo tanto, se asume que las diferencias numéricas en los totales de emisiones generadas corresponden casi exclusivamente a los procesos llevados a cabo posterior al aserrado, es decir, una vez finalizado los paneles de madera contralaminada y madera laminada encolada.

Construcción A4 - A5

En lo que se refiere a las etapas de construcción, se estimó que las emisiones ligadas a la vivienda de madera masiva aumentaron cerca del doble en comparación al caso de estudio original. Un fuerte factor con gran influencia corresponde al requerimiento de la utilización de una grúa para la distribución e instalación en obra de los paneles de madera contralaminada, en comparación a las maquinarias tradicionales requeridas por la vivienda de entramado.

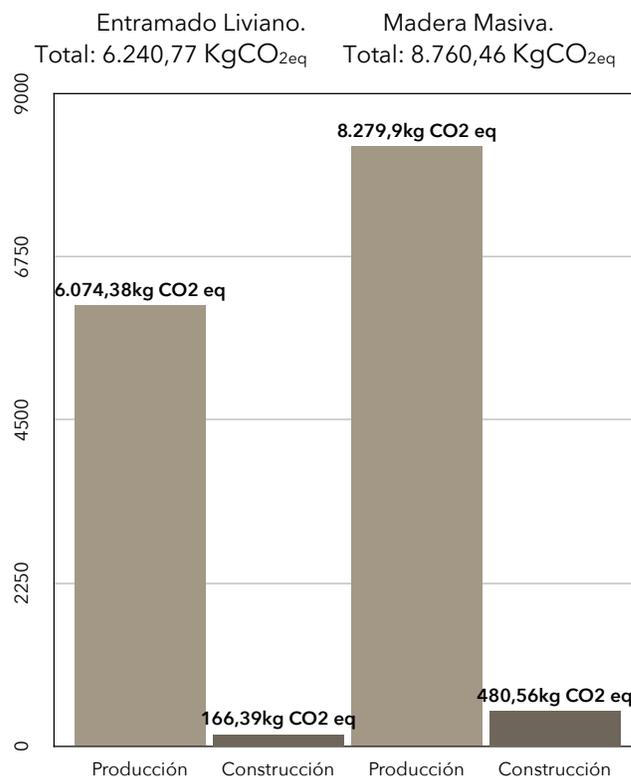


Fig. 7. Gráfico emisiones por etapas ACV. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico de la Fig. 7 se compara la totalidad de GEI emitidos a la atmósfera por ambas viviendas a lo largo de las etapas de producción y construcción. Se ve un claro foco de concentración de las emisiones de carbono durante los procesos de extracción, producción y transporte de materia prima (A1 - A3), en contraste al carbono emitido durante el proceso de construcción de las viviendas (A4 - A5). Esta tendencia comprueba lo expuesto por ciertos autores sobre la relevancia en la predominación de las emisiones producidas a lo largo de los primeros pasos llevados a cabo para construir una vivienda. Demostrando así la importancia de conocer y estudiar los distintos materiales y sus afectaciones producidas en el medioambiente al diseñar y proponer un nuevo proyecto de arquitectura.

Ahora bien, a pesar de las similitudes presentadas por ambas tipologías, con relación a la tendencia en la elevación del carbono a lo largo de los mismos procesos, se ve un claro contraste al comparar la totalidad del carbono emitido. La vivienda proyectada en madera masiva supone una mayor cantidad de emisiones de carbono, estas se estimaron en una variación de 2.519,69 KgCO_{2eq} o un 29% por sobre las emisiones totales de la vivienda de entramado tradicional. Exponiendo cuantitativamente las desventajas, en relación con las emisiones de carbono, al edificar viviendas aisladas de baja altura en madera masiva. Dado que su homólogo, la vivienda unifamiliar construida a partir del sistema tradicional de entramado liviano conllevaría una menor cantidad de emisiones totales durante los procesos en estudio.

No obstante, como se mencionó en un principio, naturalmente la madera tiene la capacidad de secuestrar y almacenar carbono a lo largo de todo su ciclo de vida. Siendo los bosques, el depósito más productivo de sumideros de carbono del planeta. Por lo tanto, en base a esta cualidad propia de la madera, se abre la posibilidad de medir las emisiones netas de carbono asociadas a ambas tipologías. Lo cual se realiza a partir de estimaciones propuestas por investigadores, en términos de kilogramos de carbono equivalente secuestrados por cada metro cúbico de madera. Dependiendo del producto final, se otorga un valor promedio estimado al carbono almacenado por cada metro cúbico de los distintos tipos de maderas/productos.

Emisiones netas de carbono

Para efectos de esta investigación, se especifican los KgCO_{2eq} almacenados por un m³ de: madera de pino radiata insigne con un 12% de humedad,

madera contralaminada, y madera laminada encolada. La investigación de la asociación Aneproma, estimó el secuestro de carbono de la madera pino radiata en -815 KgCO_{2eq} por cada metro cúbico (Aneproma, 2020). La declaración ambiental de productos efectuada por los grupos FP Innovations y Structurlam, estimaron que un m³ de madera contralaminada almacena -764,56 KgCO_{2eq}. (Structurlam, 2013). Finalmente, para efectos de la madera laminada encolada, se estimó a partir de un estudio de ciclo de vida completo, un secuestro de -937,69 KgCO_{2eq} por cada m³. (Bowers et al. 2017). En la tabla se muestra el secuestro de carbono propuesto por los diferentes productos de madera considerados por esta investigación junto a los volúmenes de dichos productos requeridos por ambas viviendas. De igual forma, se presenta la estimación total del carbono almacenado por cada vivienda.

Tipo de madera	Secuestro Carbono KgCO _{2eq}	Entramado Liviano (m ³)	Madera Masiva (m ³)
Pino radiata	-815	30,39	6,79
Contralaminada	-764,56		46,7
Laminada	-937,69		7,57
Total secuestro	KgCO_{2eq}	24.768,85	48.337,12

Tabla 3. Secuestro carbono y cuantías de madera. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la medición del carbono secuestrado por las cuantías totales de madera requeridas por ambas tipologías constructivas, se estimó que la vivienda proyectada en madera masiva almacena más del doble de carbono en comparación a la vivienda caso de estudio. En términos cuantitativos, y como se aprecia en los gráficos de la Fig. 8 y 9, el recuento de carbono neto asociado a la vivienda de entramado original se evaluó en -18.528,08 KgCO_{2eq} en comparación al cálculo de -39.576,66 KgCO_{2eq} para la vivienda equivalente. La razón fundamental de que esto ocurra es la demanda por aproximadamente el doble de madera, en términos volumétricos, para la edificación de la vivienda homologada en madera masiva. Por lo que naturalmente se entiende que al requerir una mayor cantidad de madera se almacenará una mayor cantidad de carbono en ella. Esto sugiere que, al calcular la huella de carbono neta de ambas tipologías, el impacto medioambiental asociado a los procesos estudiados difiera a lo planteado anteriormente.

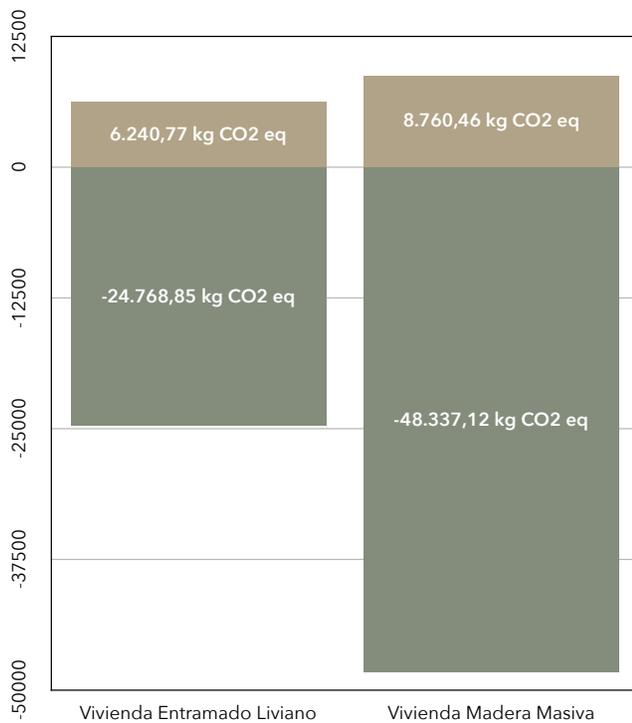


Fig. 8. Gráfico comparativo emisiones y secuestro carbono equivalente. Fuente: Elaboración propia.

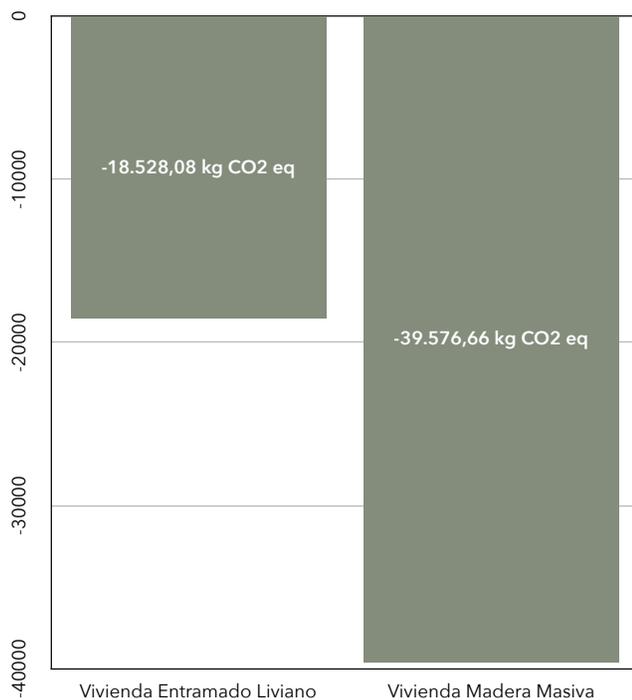


Fig. 9. Gráfico comparativo emisiones netas totales. Fuente: Elaboración propia.

Consecuentemente, al medir el ahorro de carbono se estimó que ambas tipologías presentan un total de carbono neto negativo. Esto quiere decir que, durante el crecimiento de la madera requerida por

ambas viviendas se secuestra y almacena una mayor cantidad de carbono que el emitido a la atmósfera durante los procesos de extracción, producción, transporte y construcción de las viviendas.

Ahora bien, a pesar que la emisión de GEI generados por la vivienda en madera masiva supone una mayor cantidad de carbono en oposición al emitido por el caso de estudio original, esta última supone un ahorro de carbono neto inferior. Por lo que, si se plantea evaluar la huella de carbono neta de ambas tipologías, se evidencia que al construir la vivienda aislada unifamiliar en madera masiva esta asumiría una mayor cantidad de secuestro y almacenamiento de GEI. Demostrando un supuesto beneficio ecológico, en términos de carbono al proyectar viviendas de este carácter, sabiendo las implicancias que conlleva la edificación de dichas estructuras.

5. Conclusiones

Una vez finalizada esta investigación, y posterior al análisis de los cálculos de las emisiones de carbono durante las etapas del ciclo de vida (A1 - A5), se pueden obtener dos grandes conclusiones. En primer lugar, se ve que las emisiones asociadas a la edificación de la vivienda unifamiliar aislada tradicional de entramado liviano son sustancialmente menores que las emisiones provenientes de la vivienda en madera masiva, es más, la primera emite aproximadamente un 30% menos de gases de efecto invernadero que la segunda. Sin embargo, al estimar la huella neta de carbono de ambas tipologías, y tomando en consideración el almacenamiento de carbono en la madera, es clara la superioridad de la madera masiva. Esto porque para construir una vivienda equivalente, la edificación en madera masiva requiere el doble de material. Naturalmente, al requerir una mayor cantidad volumétrica de madera se incrementa el secuestro y almacenamiento de carbono.

A raíz de esto se subentiende que la construcción de la vivienda en madera masiva requiere de una mayor cantidad de material para construir una vivienda equivalente, por lo que la deforestación y tala excesiva de plantaciones de pino radiata será el doble que la necesaria por la vivienda tradicional. Además, durante los procesos de extracción, producción, transporte y construcción, la madera masiva supera en casi un tercio las emisiones de gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera en comparación a la vivienda tradicional. Sin embargo, no se debe obviar el hecho que las construcciones en madera masiva absorben el doble de carbono que su

equivalente en madera tradicional. La razón es lógica; se necesita el doble de material, por lo que es natural que se absorba el doble de carbono, al fin y al cabo, la madera es la misma. Es simplemente un asunto de proporcionalidad. Se requiere el doble de material, por lo que se secuestra el doble de carbono. Ante esto surge la siguiente pregunta: *entendiendo que las emisiones netas de carbono son considerablemente menores que su equivalente en entramado tradicional, ¿Se debe fomentar la construcción de viviendas aisladas en madera masiva en Chile?*

Si bien la huella neta de carbono asociada a las viviendas aisladas en madera masiva es menor que las de su equivalente en madera tradicional, es sumamente importante el hecho que estas requieran cerca del doble de recursos naturales para ser edificadas. Por lo que al momento de decidir si debiese fomentarse o no la construcción de viviendas unifamiliares en madera masiva en el territorio nacional, no se puede ignorar este hecho. Se debe conocer en profundidad las potenciales ventajas y desventajas al aplicar los diferentes sistemas constructivos. Se debe determinar que es más relevante; una mayor absorción de carbono por parte de la madera, o la explotación de los recursos naturales. Se debe recordar que la deforestación tiene un impacto negativo directo sobre los ecosistemas, dañando los hábitats de diferentes especies animales y vegetales, causando la extinción de numerosos seres vivos, alterando la calidad de los suelos, disminuyendo la biomasa y la biodiversidad, contribuyendo así a una aceleración del cambio climático.

¿Se justifica entonces la doble absorción de carbono a costa del agotamiento de la superficie forestal y los numerosos efectos secundarios que este conlleva? Esta es una pregunta que escapa de los objetivos de esta investigación, pero que es interesante de reflexionar en instancias futuras. Por todo esto, es sumamente importante conocer y estudiar los distintos materiales y sus afectaciones producidas en el medioambiente al diseñar y proponer un nuevo proyecto de arquitectura, ya que el mejor sistema es aquel que no solo se adapta a las condiciones dadas, sino que también se proyecta de una manera sustentable y sostenible en el tiempo.

6. Agradecimientos

A la oficina de arquitectura y construcción *Mekis Arquitectos* por conceder acceso a información clave para efectuar esta investigación.

7. Referencias

- Aguilera, M. Benedetti, S. Gallardo, C. y Ulloa, D. (2020). Estudio percepción construcción en madera. Estudio Periódico de Temáticas de Madera N°3. Instituto Forestal, Chile. Documento de Divulgación N°49, p. 44
- Aneproma. (2020). Sostenibilidad asegurada con madera tratada.
- Banco Mundial. (2020). La construcción de viviendas en madera en Chile: Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación.
- Bowers, T. Puettmann, M. Ganguly, I. Eastin, I. (2017). Cradle-to-Gate Life-Cycle Impact Analysis of Glued-Laminated (Glulam) Timber: Environmental Impacts from Glulam Produced in the US Pacific Northwest and Southeast. Article in Forest Products journal.
- CChC. (2019). Gerencia de Estudios CChC. El Sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global. Recuperado de; https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta_45.pdf
- CONAF. (2015). Sector Forestal Chileno. Desafíos y visión 2015-2035. Documento guía para la formulación de la política forestal chilena. Recuperado de; <https://www.conaf.cl/wp-content/files/mf/1469629686folletoguia.pdf>
- CONAF. (2021). Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2020. Recuperado de; https://www.conaf.cl/wp-content/files/mf/1645720555Plantaciones_Forestales_A%C3%B1o_2020v2.pdf
- De la Fuente, A. (2019). Estudio de nuevos materiales sostenibles como alternativa a la construcción tradicional con ladrillo. Recuperado de; <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/37722>
- Department of Energy, United States of America. (2015). An assessment of energy technologies and research opportunities. Increasing Efficiency of Building Systems and Technologies. Chapter 5. Recuperado de; <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter5.pdf>

- Dulmage, S. Mousa, M. (2018). Embodied Carbon White Paper. Toronto, Ontario.
- Fernández, M. (2015). La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja energía estructural. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de; <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59387/Fernandez%20-%20La%20madera%20contralaminada%20como%20alternativa%20en%20sistemas%20de%20baja%20energ%C3%ada%20estructural..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Growing Buildings, (2017). Construcción y Emisiones de CO2 a la Atmosfera. Growing Buildings. Recuperado de; <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>
- Hernández, C. (2018). Construcción con Madera Masiva. Propuestas para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan. Recuperado de; <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5399/Construccion%20con%20madera%20masiva%20Propuesta%20para%20construir%20vivienda%20vertical%20sustentable%20en%20Zapopan.pdf?sequence=2>
- IEA (2021), *Cement*, IEA, Paris. Recuperado de; <https://www.iea.org/reports/cement>
- IEA. (2020). Renewables 2020 Analysis and forecast to 2025. Recuperado de; https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf
- INE. (2020). Permisos de edificación autorizada Edición n°244. (56), 47.
- INFOR. (2018). Instituto Forestal. Anuario Forestal. Chilean statistical yearbook of forestry. Boletín estadístico N°163. Recuperado de; <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2018/Anuario2018.pdf>
- INFOR. (2019). Construcción en madera políticas públicas, fomento y legislación europa, norte américa, oceanía y latinoamérica.
- Lechón, Y. De La Rúa, C. y Lechón, J. (2021). Environmental footprint and life cycle costing of a family house built on CLT structure. Analysis of hotspots and improvement measures. Journal of Building Engineering 39.
- Madera 21 de Corma. (22 de julio, 2021) Los rascacielos del futuro estarán hechos de madera. Recuperado de; <https://www.madera21.cl/blog/2021/07/22/los-rascacielos-del-futuro-estaran-hechos-de-madera/>
- Madera 21 de Corma. (30 de marzo 2020). Materiales y huella de carbono: el papel de la madera para retener las emisiones de co2. Recuperado de; <https://www.madera21.cl/blog/2020/03/30/materiales-y-huella-de-carbono-el-papel-de-la-madera-para-retener-las-emisiones-de-co2/>
- MMA. (2018). Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático. Recuperado de; <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>
- Oliver, C. Nassar, N. Lippke, B. McCarter, J. (2014). Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation with Wood and Forests. Journal of Sustainable Forestry, 248-275.
- OMM (2019) Organización Meteorológica Mundial. La concentración de los gases de efecto invernadero en la atmosfera alcanza nuevos récord mundial. Recuperado de; <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentracion-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atmosfera-alcanza>
- Ortega, M. (2020). Economía circular en la construcción. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá. Recuperado de; <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36610/OrtegaCastrillonMariaXimena2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pilar, C. (2021). Madera en la construcción. Sustentabilidad ambiental desde la perspectiva circular de la materia y la energía. 26° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Edición Virtual 2021. Recuperado de; https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-antiores/2021/26jaie-trabajos/093_TRA-BAJO.pdf

Rivera, F. (2020). Carbono incorporado en la construcción: estimación de emisiones asociadas a nuevas Viviendas de Interés Social y Prioritario en Bogotá, 2020- 2030. Tesis Universidad de los Andes, Bogotá.

Strcturlam, FP Innovations (2013). Environmental Product Decalration, CrossLam.

Van der Lugt, P. (2019) Carbon Storage Utilising Timber Products. Recuperado de; <https://www.ac-coya.com/app/uploads/2020/04/Carbon-Storage-Using-Timber-Products.pdf>

Wiche, P., Rodríguez, B., Granato, D. (2020) Alternativas Metodológicas de Calculadoras de Huella de Carbono. Publicado por Instituto de la Construcción, 2020. Santiago, Chile.

Winkler, M. (2021). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Industria Forestal en Chile. Serie Minutas N°68-21. Recuperado de; https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32419/1/N_68_21_Industria_Forestal_en_Chile.pdf

Wood Solutions. (29 de julio 2020). How It's Made: Cross Laminated Timber (CLT). <https://www.youtube.com/watch?v=rK49Uj-DivWM>

World Green Building Council. (2019). Bringing embodied carbon upfront. Recuperado de; <https://www.worldgbc.org/news-media/bringing-embodied-carbon-upfront>

Zhikang, Q. (2019). Cross laminated timber (CLT) future potential in Ontario compared with BC and Quebec. Recuperado de; <https://knowledgecommons.lakeheadu.ca/bitstream/handle/2453/4680/QinZ2019b-1a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

8. Anexos

Anexo 1. Inventarios principales materiales requeridos por ambas tipologías de vivienda.

Anexo 2. Transporte madera aserrada junto a etapas del análisis de ciclo de vida consideradas.

Anexo 3. Transporte madera masiva junto a etapas del análisis de ciclo de vida consideradas.

Anexo 4. Transporte región Biobío - región La Araucanía.

Anexo 5. Comparación volúmenes totales de materiales principales de ambas tipologías

Anexo 6. Resultados obtenidos por componentes de ambas tipologías de vivienda.

Anexo 7. Cálculo de emisiones de carbono equivalente para las etapas de transporte de materia prima (A2) y transporte de materiales de construcción (A4) de ambas tipologías de vivienda.

Todos los anexos se encuentran disponibles en el documento adjunto.

Anexos

Anexo 1. Inventarios de los principales materiales requeridos por ambas viviendas.

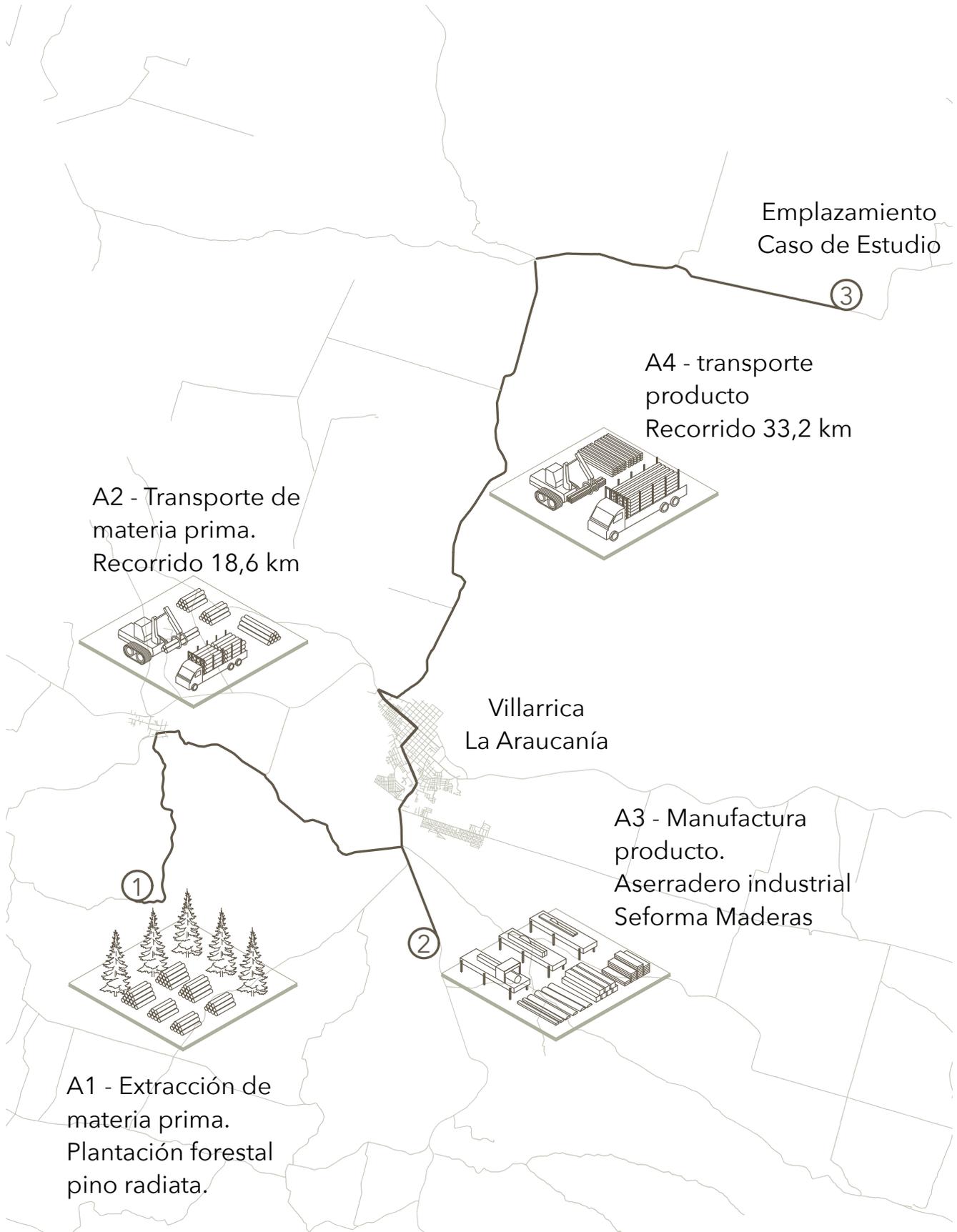
Tabla 1.1. Listado principales materiales vivienda entramado liviano. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Material	Dimensiones	Unidad	Cantidad (m3)	Peso (kg)	Densidad (kg/m3)
Muros	Pino radiata	2"x4" de 3,2m	132	2,18	653,40	450,00
	Pino radiata	2"x2" de 3,2m	60	0,50	240,00	450,00
	Terciado	18mm	233	8,13	28,90	551,00
Losas	Pino radiata	2"x2" de 3,2m	172	1,42	688,00	450,00
Cubierta	Pino radiata	2"x4" de 3,2m	100	1,34	603,00	450,00
	Fieltro	10/40M2	8	1,41	0,04	0,03
	ZINC	0,35x0,095x3m	16	1,41	7,20	7.800,00
Vigas	Pino radiata	3"x8" de3,2m	111	5,50	2.475,00	450,00
Fundaciones	Enfierradura	12 mm	13	0,03	18,00	7.697,59
	Perfil acero	100x50x3mm	53	0,24	1.846,08	7.697,59
	Hormigón	25 kg	20	3,33	500,00	2.300,00
Particiones	Pino radiata	2"x5" de 3,2m	30	0,62	163,50	450,00
	Pino radiata	2"x3" de 3,2m	6	0,07	34,20	450,00
	Terciados	15mm	100	0,12	0,43	535,00
Revestimiento	Pino radiata	1"x4" de3,2m	860	7,10	3.195,00	450,00
	Pino radiata	1"x3" de3,2m	1.011	6,26	2.817,00	450,00
	Pino radiata	1"x6" de3,2m	787	4,04	1.818,00	450,00
	Pino radiata	1"x2" de3,2m	806	1,36	612,00	450,00
Aislación	Poliestireno	20 mm	155	12,78	128,80	10,00
	Acústica	12,5x2x1,2m	10	3,00	7,50	2,50

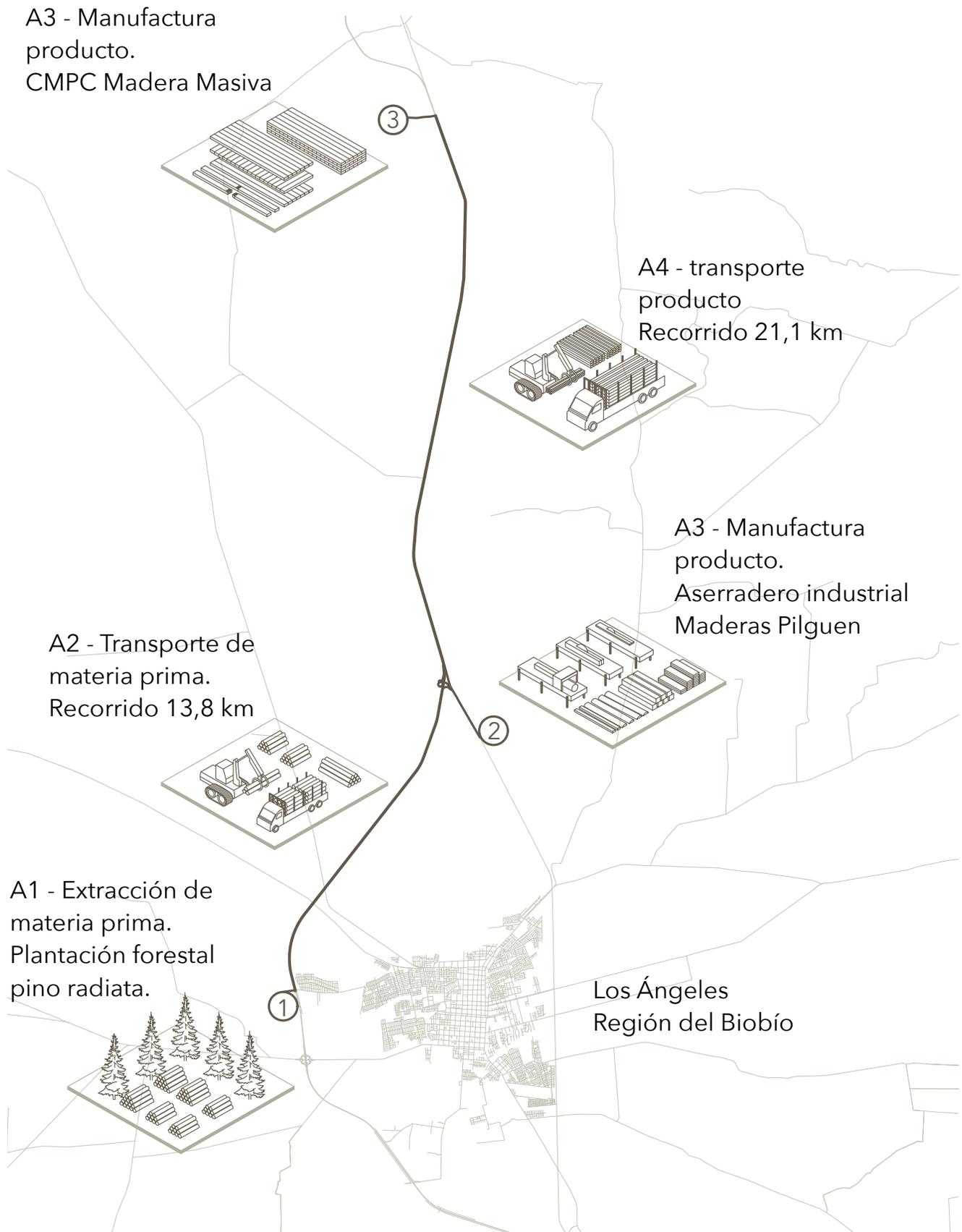
Tabla 1.2 Listado principales materiales vivienda madera masiva. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Material	Dimensiones	Cantidad (m3)	Peso (kg)	Densidad (kg/m3)
Muros	Madera contralaminada	90 mm	11,71	5.503,70	470
Losas	Madera contralaminada	120 mm	16,73	7.863,10	470
Cubierta	Madera contralaminada	120 mm	9,87	4.638,90	470
Vigas	Madera laminada	600x90 mm	7,57	3557,90	470
Fundaciones	Hormigón	25 kg	7,13	16.399,00	2.300,00
	Viga acero	150 mm	0,24	1.847,42	7.697,59
Particiones	Madera contralaminada	90 mm	8,39	3.943,30	470
Revestimiento	Pino radiata	1"x3" de3,2m	6,79	3.055,50	450
Aislación	Poliestireno	20 mm	2,84	28,40	10

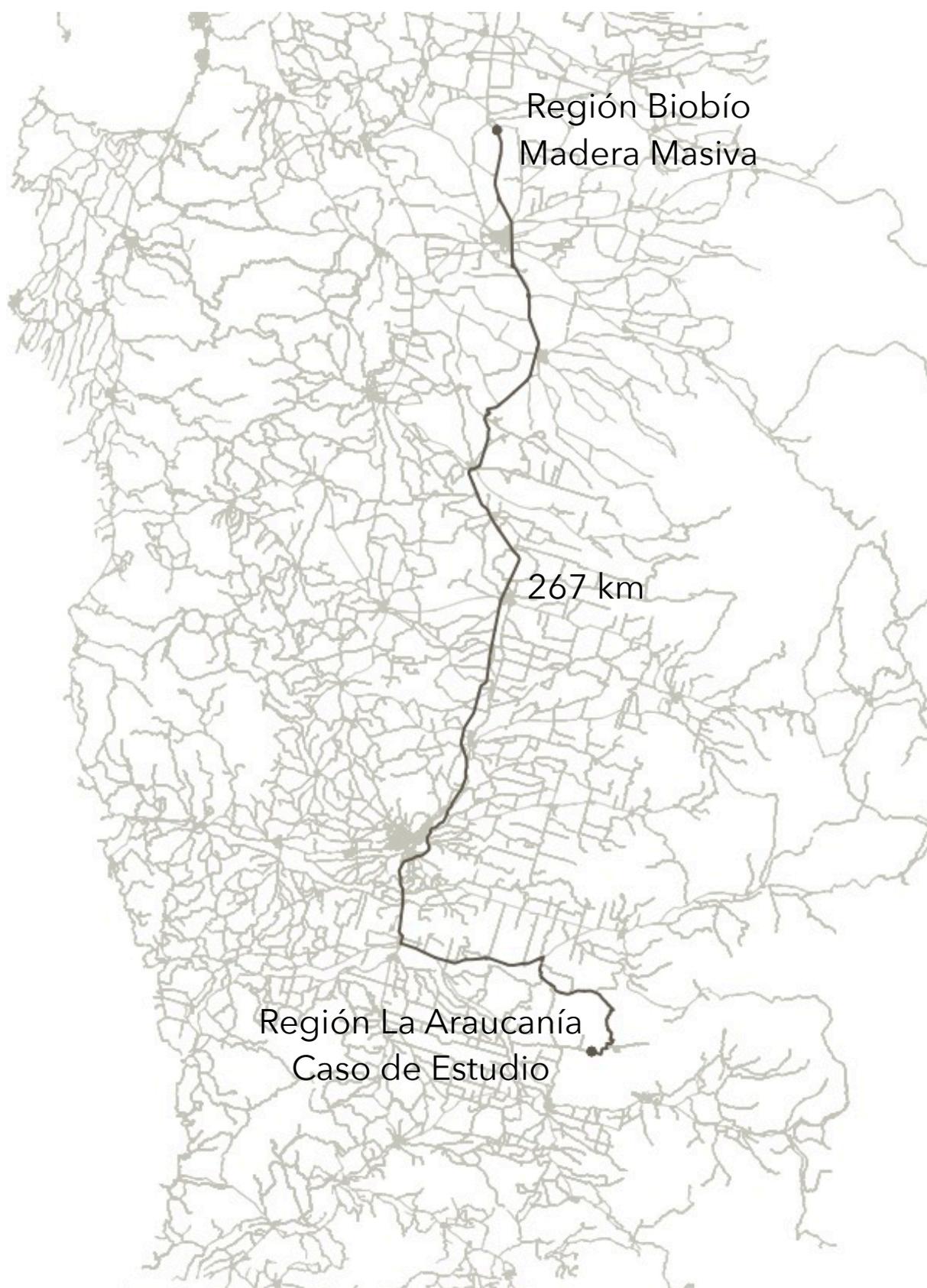
Anexo 2. Transporte madera aserrada. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 3. Transporte madera masiva. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4. Transporte región Biobío - La Araucanía. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 5. Volúmenes totales de materiales principales de ambas tipologías. Fuente: Elaboración propia.

Volumen Materiales	Vivienda	Vivienda
	Entramado Liviano	Madera Masiva
Madera	38,64 m ³	61,06 m ³
Hormigón	3,33 m ³	7,13 m ³
Acero	0,36 m ³	0,24 m ³
Poliéstero	12,78 m ³	2,84 m ³

Anexo 6. Resultados por componentes. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Entramado Liviano (KgCO _{2eq})	Madera Masiva (KgCO _{2eq})
Aislación	1.203,53	471,19
Losas	121,52	2.720,19
Fundaciones	4.274,57	4.533,17
Cubierta	1.877,03	1.604,80
Muros	556,1	4.662,31

Anexo 7. Cálculo de emisiones de carbono equivalente para las etapas de transporte de materia prima (A2) y transporte de materiales de construcción (A4). Cálculo realizado en base a estimación propuesta por el grupo IPCC de 2,69 KgCO_{2eq} por litro de combustible diésel quemado por camiones de carga pesada. Se supone el uso de un único camión con capacidad para trasladar los productos requeridos por cada vivienda. El camión propuesto tiene un rendimiento de 6 km/l cargado y de 10 km/l descargado. Se estima pertinente calcular los viajes de ida y vuelta del camión.

Tabla 7.1. Vivienda entramado liviano.

Camión diésel	Cargado (ida)	Descargado (vuelta)
Rendimiento diésel	6 km/l	10 km/l
Traslado 1 (km)	18,6	18,6
Traslado 2 (km)	33,2	33,2
Gasto diésel (litros)	8,63	5,18
Emisión kgCO _{2eq}	23,22	13,93

Siendo el traslado 1 el desplazamiento efectuado por el camión de carga forestal desde la plantación de pino radiata talado hasta el aserradero industrial propuesto. Y el traslado 2 el viaje realizado desde este último hasta el emplazamiento de la obra.

Se estimó un total de **37,16 KgCO_{2eq}** emitidos por las etapas A2 y A4 de la vivienda de entramado.

Tabla 7.2. Vivienda proyectada en madera masiva.

Camión diésel	Cargado (ida)	Descargado (vuelta)
Rendimiento diésel	6 km/l	10 km/l
Traslado 1 (km)	13,8	13,8
Traslado 2 (km)	21,1	21,1
Traslado 3 (km)	267	267
Gasto diésel (litros)	50,32	30,19
Emisión kgCO _{2eq}	135,35	81,21

Siendo el traslado 1 el desplazamiento efectuado por el camión de carga forestal desde la plantación de pino radiata talado hasta el aserradero industrial propuesto. Y el traslado 2 el recorrido desde el aserradero hasta la planta manufacturera de CLT en la región del Biobío. Por último, el traslado 3 el desplazamiento final hasta el sitio de la obra.

Se estimó un total de **216,56 KgCO_{2eq}** emitidos por las etapas A2 y A4 de la vivienda en madera masiva.

