



**UNIVERSIDAD
MAYOR**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA CONSTRUCTIVO
INDUSTRIALIZADO DE PANELES DE MADERA Y EL MÉTODO DE
PREFABRICACIÓN DE HORMIGÓN: APLICACIONES EN LA
CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES DE INTERÉS SOCIAL
EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE**

Proyecto de Título, para optar al Título de Constructor Civil.

Estudiante:

Nicolás Rodolfo Oyarzún Lagos.

Profesor Guía:

Francisco Sanhueza.

Fecha:

Noviembre 2024.

Santiago Chile.

Resumen

La presente tesis evalúa comparativamente el sistema constructivo industrializado de paneles de madera y el método de prefabricación de hormigón en términos de eficiencia, costos y sostenibilidad ambiental en la construcción de viviendas unifamiliares de interés social en la zona centro-sur de Chile. A través de una metodología mixta, se analizó bibliografía relevante y se aplicaron estudios de caso para comparar ambos sistemas. Adicionalmente, se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV) para estimar el impacto ambiental de cada método y se desarrolló una propuesta de zonificación basada en los resultados obtenidos, identificando áreas óptimas para el uso de paneles de madera o prefabricación de hormigón según criterios de eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental. Los resultados indican que los paneles de madera ofrecen ventajas en eficiencia energética y reducción de la huella de carbono, siendo más adecuados para zonas rurales y periurbanas con acceso a recursos forestales. Por otro lado, el hormigón prefabricado destaca en durabilidad y resistencia estructural, recomendándose para áreas urbanas con mayor densidad poblacional y actividad sísmica. La zonificación propuesta proporciona una herramienta estratégica para la planificación de proyectos habitacionales en función de criterios ambientales y económicos específicos para cada región.

Palabras clave: Sistemas Constructivos Industrializados. Paneles de Madera. Método de Prefabricación de Hormigón. Viviendas Unifamiliares de interés social

Abstract

The present thesis comparatively evaluates the industrialized construction system of wood panels and the prefabricated concrete method in terms of efficiency, costs, and environmental sustainability in the construction of single-family social housing in the central-southern region of Chile. Through a mixed methodology, relevant literature was reviewed, and case studies were applied to compare both systems. Additionally, a life cycle assessment (LCA) was conducted to estimate the environmental impact of each method, and a zoning proposal was developed based on the results obtained, identifying optimal areas for the use of wood panels or prefabricated concrete according to construction efficiency, cost, and environmental sustainability criteria. The results indicate that wood panels offer advantages in energy efficiency and carbon footprint reduction, making them more suitable for rural and peri-urban areas with access to forest resources. On the other hand, prefabricated concrete stands out for its durability and structural strength, making it recommended for urban areas with higher population density and seismic activity. The proposed zoning provides a strategic tool for the planning of housing projects based on specific environmental and economic criteria for each region.

Keywords: Industrialized Construction Systems, Wood Panels, Concrete Prefabrication Method, Single-Family Social Interest Housing

Índice

Introducción.....	7
1.1. Planteamiento del Problema	8
1.2. Pregunta de investigación.....	8
1.3. Objetivos.....	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
MARCO TEÓRICO	10
2.1. Antecedentes.....	10
2.2. Marco conceptual	15
2.2.1. Sostenibilidad en la construcción	15
2.2.2. Sistemas constructivos industrializados	20
2.2.3. Paneles de madera como material constructivo.....	25
2.2.4. Prefabricación de hormigón.....	30
2.2.5. Análisis de costos de la construcción asociados a cada método constructivo.....	32
2.2.6. Normativas y estándares de la construcción.....	35
2.2.7. Estudio de casos y aplicaciones prácticas en Chile	47
Metodología del trabajo.....	58
Resultados.....	61
4.1. Revisión bibliográfica.....	61
4.2. Estudios de caso de modelos comparados en madera y concreto prefabricado ...	71
4.2.1. Caso de Estudio 01	71
4.2.2. Caso de Estudio 02	74
4.2.3. Caso de Estudio 03	77
4.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en la vivienda social chilena en madera y concreto	82
4.4. Recomendaciones para el Desempeño Ambiental de la vivienda social chilena en madera y concreto.....	90
4.5. Propuesta de zonificación en función a criterios de eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental para la zona centro-sur de Chile	91
4.5.1. Características geográficas y climáticas de la Zona Centro-Sur de Chile.....	93
1. Región del Maule (VII Región).....	93
2. Región de Ñuble (XVI Región).....	94
3. Región del Biobío (VIII Región).....	94

4. Región de La Araucanía (IX Región).....	95
4.5.2. Distribución de los recursos materiales en la Zona Centro-Sur de Chile.....	95
1. Región del Maule	95
2. Región de Ñuble	96
3. Región del Biobío.....	96
4. Región de La Araucanía	97
4.5.3. Normativas locales de la Zona Centro-Sur de Chile	97
1. Normativas Urbanísticas Generales.....	98
2. Normativas Ambientales	98
3. Normativas Específicas para la Construcción	99
4. Restricciones Urbanísticas Locales y Protección del Patrimonio	99
5. Normativa sobre la Gestión de Residuos en la Construcción.....	100
4.5.4. Análisis de eficiencia constructiva para la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile	100
4.5.5. Análisis de costos de la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile	103
4.5.6. Análisis de sostenibilidad ambiental de la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile	105
4.5.7. Zonas adecuadas para paneles de madera en la construcción de viviendas sociales de Zona Centro-Sur de Chile	106
4.5.8. Zonas adecuadas para la prefabricación de hormigón en la construcción de viviendas sociales de la Zona Centro-Sur de Chile	107
4.5.9. Mapa de zonificación.....	108
Conclusiones.....	111
Referencias bibliográficas	116

Índice de figuras

Figura 1: Colaboración entre Techo Chile y Tetra Pak.....	53
Figura 2: Edificios de tres pisos, diseñados por la constructora Consolida	54
Figura 3: Edificios de cuatro pisos que emplean madera como su principal material constructivo.....	55
Figura 4: Rehabilitación y ampliación de edificios existentes por PLUS Chile	56
Figura 5: Fases fundamentales del Análisis del Ciclo de Vida.	59
Figura 6: Aspectos a considerar en la Evaluación de desempeño ambiental de viviendas de paneles de madera u hormigón prefabricado	59
Figura 7: Costo aproximado para diferentes tipos de estructuras de hasta 2 pisos	61
Figura 8: Costo aproximado para tipos de estructuras en altura mayor a 3 pisos	61
Figura 9: Superficie autorizada para todos los materiales. Años 2002 a 2017.....	62
Figura 10: Superficie autorizada para todos los materiales con destino vivienda. Años 2002 a 2017	64
Figura 11: Superficie autorizada para todos los materiales con destino vivienda, según regiones. Año 2017	66
Figura 12: Superficie autorizada con destino vivienda de uno y dos pisos. Años 2002-2017	67
Figura 13: Superficie autorizada con destino vivienda según número de pisos. Años 2002-2017.....	68
Figura 14: Competitividad en el mercado en función de la variación de costos en base nacional.....	69
Figura 15: Caso 01: Vista y distribución del edificio de condominio que alberga vivienda social en Concepción, Chile.....	71
Figura 16: Caso 02: Distribución en planta de piso tipo residencial en Torre Mjøsa. Noruega... ..	74
Figura 17: Caso 03: Vista 3D del modelado básico en SAP para el proyecto de vivienda social en Huechuraba.....	77
Figura 18: Etapas del ciclo de vida de la construcción según modelo propuesto por la ISO 21930	87
Figura 19: Región del Maule.....	108
Figura 20: Región del Ñuble	108
Figura 21: Región del Bío Bío	109
Figura 22: Región de la Araucanía.....	109

Índice de tablas

Tabla 1: Características generales de los sistemas constructivos industrializados.....	21
Tabla 2: Tipos de paneles de madera utilizados en la construcción.....	25

Tabla 3: Propiedades mecánicas y físicas que hacen a los paneles de madera adecuados para la construcción.....	27
Tabla 4: Clasificación de los prefabricados	30
Tabla 5: Beneficios del sistema constructivo industrializado de paneles de madera desde la perspectiva de costos	32
Tabla 6: Beneficios del sistema constructivo industrializado de hormigón desde la perspectiva de costos	34
Tabla 7: Clases de construcciones categorizadas en función de los materiales predominantes utilizados.....	36
Tabla 8: Categorías normadas de prefabricados de hormigón en Chile	38
Tabla 9: Normas Técnicas Oficiales para elementos de construcción en madera no sometidos a cálculo estructural (Artículos 5.6.6 y 5.6.8 de la OGUC)	41
Tabla 10: Normas Técnicas Oficiales para realizar los cálculos estructurales.....	41
Tabla 11: Normas Técnicas Oficiales establecidas en el DS10 relacionadas con madera	42
Tabla 12: Políticas nacionales que incentivan el uso de la madera en la construcción	42
Tabla 13: Principales subsidios según estándares términos	43
Tabla 14: Normas ISO relevantes para la construcción en madera en Chile	44
Tabla 15: Beneficios del cumplimiento de Normas ISO.....	45
Tabla 16: Sistemas de certificación más relevantes que hoy favorecen el uso de madera.....	46
Tabla 17: Ficha Técnica del Caso 01	71
Tabla 18: Resultados comparados del Caso 01	72
Tabla 19: Ficha Técnica del Caso 02	74
Tabla 20: Fortalezas y debilidades de cada material descritas para el Caso 02	75
Tabla 21: Caso 03: Resultados comparativos obtenidos según materialidad.....	78
Tabla 22: Materiales principales utilizados en cada tipo de construcción	82
Tabla 23: Tecnologías implementadas en cada tipo de construcción.....	83
Tabla 24: Ventajas de las viviendas de concreto prefabricado	86
Tabla 25: Etapas del ciclo de vida de la construcción según modelo propuesto por la ISO 2193087	
Tabla 26: Criterios a considerar en la zonificación propuesta	92

Introducción

La construcción de viviendas representa un desafío multifacético que involucra consideraciones de eficiencia, costo y sostenibilidad, especialmente en el contexto de viviendas unifamiliares de interés social (Banco Mundial, 2020). En la zona centro-sur de Chile, estas preocupaciones adquieren una dimensión particular debido a las características geográficas y socioeconómicas específicas de la región, que demandan soluciones constructivas adaptativas y sostenibles. Ante este panorama, la elección del sistema constructivo emerge como un factor crítico en el desarrollo de proyectos habitacionales que no solo aspiren a mitigar el déficit de vivienda, sino también a promover la sostenibilidad ambiental y la eficiencia económica (Centro UC de Innovación en Madera, 2019).

Este estudio se propone realizar un análisis comparativo entre dos sistemas constructivos predominantes: el sistema constructivo industrializado basado en paneles de madera y el método de prefabricación de hormigón. Ambos métodos ofrecen respuestas distintas a las exigencias de rapidez constructiva, costos de producción y compatibilidad ambiental, elementos que son fundamentales en el marco de la construcción de viviendas de interés social. Se propone también una aplicación práctica y territorial para los resultados obtenidos, que agregue valor al trabajo y proporcione a la vez una herramienta visual y estratégica para la toma de decisiones en futuros proyectos de construcción en la región, al proponer una zonificación que se basará en el análisis realizado a partir de los criterios de eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental evaluados para identificar en una representación cartográfica las áreas donde sería más adecuado implementar los dos principios constructivos en estudio. La relevancia de esta investigación radica en su capacidad para informar decisiones críticas en el sector de la construcción, proporcionando evidencia concreta sobre las ventajas y limitaciones de cada sistema en el contexto específico de la zona centro-sur de Chile.

La importancia de este análisis se amplifica en un momento en que Chile, al igual que muchos otros países, enfrenta el reto de avanzar hacia modelos de desarrollo urbano sostenibles. En este sentido, la investigación no solo tiene el potencial de influir en la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas constructivas locales, sino también de contribuir a la discusión global sobre construcción sostenible y vivienda social. Así, el estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la construcción de ciudades y comunidades sostenibles, la promoción de una industrialización inclusiva y sostenible, y el aseguramiento de patrones de consumo y producción sostenibles. El alcance de esta investigación se centra en la evaluación comparativa de los sistemas constructivos mencionados, con un enfoque particular en tres dimensiones: eficiencia constructiva, análisis de costos y sostenibilidad ambiental. A través de una metodología mixta que incluye revisión bibliográfica, análisis de estudios de caso y evaluación del ciclo de vida (ACV), este estudio busca ofrecer insights valiosos para académicos, profesionales del sector y formuladores de políticas, facilitando la adopción de prácticas de construcción que respondan de manera efectiva a las necesidades habitacionales de la población, sin comprometer los recursos y el bienestar de las futuras generaciones (BID, 2020; BID, 2021).

1.1. Planteamiento del Problema

El desarrollo sostenible y la eficiencia en la construcción de viviendas se han convertido en prioridades fundamentales para enfrentar los desafíos de la urbanización rápida y el cambio climático. En este contexto, la elección de sistemas constructivos óptimos es crucial, especialmente en regiones vulnerables y de rápido crecimiento como la zona centro-sur de Chile. Esta región, caracterizada por su diversidad geográfica y climática, plantea desafíos específicos para la construcción de viviendas unifamiliares de interés social, donde la eficiencia, los costos y la sostenibilidad ambiental son consideraciones primordiales.

En este escenario, emergen dos sistemas constructivos predominantes: el sistema constructivo industrializado basado en paneles de madera y el método prefabricado de hormigón. Ambos ofrecen ventajas y limitaciones distintas en términos de eficiencia constructiva, costos económicos e impacto ambiental. Sin embargo, existe una escasez de estudios comparativos detallados que aborden estas dimensiones en el contexto específico de la zona centro-sur de Chile, lo que dificulta la toma de decisiones informadas por parte de los desarrolladores de viviendas, las autoridades gubernamentales y los profesionales del sector.

Esta investigación se justifica en el contexto de los desafíos significativos que enfrenta Chile en su desarrollo urbano sostenible, como son el déficit de viviendas, la dependencia de energías fósiles y la necesidad de mitigar los impactos del cambio climático y las crisis sanitarias recientes. El problema se magnifica dada la escasez de viviendas, que alcanza a más de 397.613 unidades a nivel nacional, y podría superar 1.303.484 al considerar el déficit cualitativo (Banco Mundial, 2020).

Al abordar este problema, se debe tener en cuenta la baja productividad en el sector de la construcción y cómo la adopción de sistemas constructivos basados en la madera podría mejorar la productividad y calidad. La madera se postula como una opción sostenible debido a sus propiedades térmicas y acústicas, así como su potencial para reducir el tiempo de construcción (Gysling et al., 2021).

La viabilidad de la construcción en madera también se ve apoyada por los avances tecnológicos y la capacidad de la industria forestal chilena, lo que sugiere un potencial para satisfacer la demanda de viviendas y responder a los retos medioambientales (Gysling et al., 2021). Sin embargo, se identifica el transporte como un problema significativo para los prefabricados de hormigón, destacando la necesidad de modelos de negocio innovadores como las plantas móviles de prefabricados (de Sutter Arroyo, 2015).

El informe de Holz (2022) proporciona un análisis detallado sobre la evolución de los precios de los materiales de construcción, mostrando una tendencia general a la disminución en los precios pero aún elevados en comparación con el periodo pre-pandemia. Esto plantea una consideración crítica sobre la selección de materiales para el desarrollo de soluciones habitacionales asequibles. Ante este panorama, se plantea la relevancia de investigar a fondo los sistemas constructivos de paneles de madera y prefabricación de hormigón, con el fin de identificar cuál ofrece la solución más sostenible y rentable en el contexto chileno, tomando como referencia la perspectiva de costos operativos y las externalidades ambientales.

1.2. Pregunta de investigación

¿Cómo se comparan el sistema constructivo industrializado basado en paneles de madera y el método prefabricado de hormigón en términos de eficiencia, costos y sostenibilidad

ambiental, en el contexto de la construcción de viviendas unifamiliares en la zona centro-sur de Chile?.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar comparativamente los sistemas constructivos basados en paneles de madera y en prefabricación de hormigón en la construcción de viviendas unifamiliares en la zona centro-sur de Chile, analizando su eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental, y proponiendo una zonificación que optimice el uso de cada método según dichos criterios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la eficiencia constructiva de los sistemas basados en paneles de madera y los métodos prefabricados de hormigón, en términos de tiempo de construcción y mano de obra requerida para viviendas unifamiliares en la zona centro sur del país.
- Comparar costos totales de construcción de viviendas unifamiliares utilizando ambos métodos, incluyendo materiales, mano de obra y mantenimiento a largo plazo.
- Evaluar el desempeño ambiental de los sistemas constructivos mencionados y la sostenibilidad de materiales y tecnologías de construcción utilizadas en ambos.
- Proponer una zonificación en la zona centro-sur de Chile que identifique áreas óptimas para el uso de prefabricación en hormigón o paneles de madera, basándose en eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El desarrollo urbano sostenible y la respuesta a la crisis habitacional son dos de los desafíos más significativos que enfrenta Chile en la actualidad. Los informes del Banco Mundial (2020) y de Gysling et al. (2021) subrayan la urgencia de abordar estos desafíos mediante la adopción de sistemas constructivos sostenibles y económicamente viables. La construcción con madera, en particular, se destaca como una solución potencial, ofreciendo beneficios en términos de sostenibilidad y eficiencia energética, así como una menor dependencia de energías fósiles, comparada con la construcción tradicional.

Las construcciones de madera, al adherirse a estándares de construcción adecuados, no son necesariamente más baratas que las realizadas con otros materiales. No obstante, la integración de la madera en procesos de construcción altamente industrializados puede generar ahorros significativos en tiempos y costos de ejecución (Banco Mundial, 2020).

Los avances en la construcción industrializada con madera se perfilan hoy como una oportunidad estratégica para elevar la productividad y calidad en el sector. Las características de la madera, incluyendo la reducción de tiempos de construcción, la capacidad de las empresas de ofrecer soluciones tecnológicamente avanzadas, la resistencia estructural con relación a su peso, y su sostenibilidad ambiental, presentan soluciones eficaces a los desafíos mencionados. La madera no solo permite entonces una construcción más rápida y de menor impacto ambiental, sino que también posibilita la creación de viviendas de alta calidad y confort para sus ocupantes, a la vez que fomenta el uso de recursos locales y sostenibles (Banco Mundial, 2020).

El estudio de Alvarado Alvarado (2019) destaca la evolución de la construcción desde la revolución industrial y cómo la madera, subvalorada en el contexto chileno, representa una alternativa sostenible, eficiente y segura que cumple con los estándares normativos y las necesidades de habitabilidad. Aporta entonces una reflexión crítica sobre la evolución de las técnicas y materiales constructivos desde la revolución industrial hasta la actualidad, destacando cómo la expansión de la civilización ha incrementado la demanda por nuevas viviendas, espacios comerciales, oficinas, y diversas estructuras que faciliten la vida cotidiana. Con el desarrollo de materiales como ladrillos, acero, metalcom, cemento, y otros, se ha logrado incrementar la seguridad de las construcciones, lo cual es fundamental en el contexto actual que exige altos estándares normativos en construcción. Sin embargo, su tesis señala que el ciclo de vida completo de estos materiales —desde su producción hasta su disposición final— puede tener consecuencias adversas para el medio ambiente.

El trabajo de Alvarado subraya por lo tanto, la creciente preocupación por el cambio climático, evidenciado por fenómenos como el derretimiento de glaciares, el aumento del nivel del mar, y el incremento de la temperatura global, lo que sugiere la urgencia de adoptar medidas de prevención para mitigar impactos ambientales negativos. En este contexto, la tesis propone la sustentabilidad como el camino a seguir, resaltando la madera como un material constructivo subvalorado en Chile, a pesar de sus propiedades excepcionales en

términos de sustentabilidad, eficiencia energética y capacidad degradativa. Alvarado argumenta que la madera, desde su extracción hasta el fin de su ciclo de vida, requiere un mínimo de energía para su producción, y sus residuos son biodegradables, lo que la convierte en una opción viable y sustentable para la construcción que cumple con los estándares normativos actuales y satisface las necesidades de habitabilidad y seguridad (Alvarado Alvarado, 2019).

Por otro lado, el informe del Centro UC de Innovación en Madera (2019) aporta una perspectiva económica, señalando el aumento en la preferencia por la madera como material de construcción y la necesidad de incorporar tecnologías industrializadas para la competitividad en la construcción de viviendas de altura media. La investigación representa un valioso aporte al conocimiento del sector de la construcción en Chile, enfocándose en la madera como material constructivo. Este estudio se propuso en su momento como objetivo fundamental la generación de estadísticas relevantes, representativas y funcionales para el ámbito de la construcción, abarcando diversas materialidades y enfatizando en la evolución de la elección de los materiales

Entre los hallazgos más significativos del informe se encuentra la constatación de un incremento en la preferencia por la madera como material de construcción, ubicándola actualmente como la segunda alternativa más popular en el país, solo superada por el hormigón y por encima de la albañilería. Este predominio de la madera se hace aún más evidente en regiones con una fuerte presencia forestal, como Biobío, Araucanía, Los Lagos, Los Ríos, Aysén y Magallanes, especialmente en construcciones destinadas a vivienda (Centro UC de Innovación en Madera, 2019).

Un aspecto destacado en el análisis es que la madera se convierte en la materialidad principal en construcciones de uno y dos pisos, superando a la albañilería y el hormigón. Este dato refuerza la posición de la madera como una opción preferente en determinados segmentos del mercado constructivo (Centro UC de Innovación en Madera, 2019).

Desde la perspectiva de los costos de construcción, el informe resalta la importancia de la industrialización en la definición del costo final de las estructuras de madera. Se subraya la necesidad de adoptar tecnologías industrializadas disponibles en el mercado nacional para que la construcción en madera sea competitiva, especialmente para edificaciones de cinco y seis pisos. Esta recomendación apunta a la competitividad de la madera en particular en las zonas Centro y Norte de Chile, mientras se requieren empresas industrializadoras que mejoren los costos en la Zona Sur y Austral para acortar las brechas con el hormigón, indicando así, una dirección clara para el avance tecnológico y la adopción de nuevas metodologías constructivas en el país (Centro UC de Innovación en Madera, 2019).

Santa María y otros (2019) aportan por su parte una dimensión técnica y normativa, al explorar el comportamiento sísmico de las construcciones de madera. El interés de la investigación se centra en el desarrollo de edificaciones de madera en Chile, un país con una significativa industria forestal y un alto riesgo sísmico. La investigación aborda la necesidad de comprender mejor el comportamiento sísmico de sistemas constructivos en madera de mediana altura, con el objetivo de posibilitar el aumento de la altura permitida de estructuras

de marco ligero de madera de dos a seis pisos en el mercado chileno. Esta necesidad surge debido a las incertidumbres acerca de si el factor de modificación de respuesta (R-factor) actual en la normativa de diseño sísmico chilena es adecuado para edificios de seis pisos (Santa María, y otros, 2019).

Su estudio se enfocó en establecer un R-factor calibrado para sistemas de marco de madera de mediana altura, acorde con las expectativas de desempeño de la normativa chilena. La investigación incluyó el desarrollo de configuraciones de edificios arquetipo en madera de marco ligero, diseño estructural de estos arquetipos, realización de pruebas monotónicas y cíclicas de elementos de paredes de corte, pruebas a nivel de subensamblajes, pruebas mecánicas de los paneles de revestimiento estructural de madera, y la modelización numérica para completar los modelos de paredes de corte y de los edificios arquetipos. A través de simulaciones de análisis dinámico de historias de tiempo no lineal, se evaluó el factor de desempeño sísmico, siguiendo las directrices de FEMA P-695 (Santa María, y otros, 2019).

Las conclusiones de la investigación indicaron que, aunque la normativa NCh 433 asume que un R-factor de 5.5 proporciona un nivel aceptable de seguridad ante colapsos, los resultados obtenidos sugieren que un R-factor de 6.5 también cumple con los objetivos de desempeño ante colapsos de la metodología FEMA P-695. Por lo tanto, se recomienda un valor de $R=6.5$ para el R-factor en Chile, lo que podría permitir el diseño sísmico de sistemas estructurales estudiados para edificaciones de hasta seis pisos de altura. Además, se demostró que diseños estructurales que permiten un límite máximo de desplazamiento entre pisos de 0.004 (0.4%) cumplen con la metodología de evaluación de colapsos, sugiriendo que tales diseños son seguros para edificaciones de hasta seis pisos. Este estudio contribuye en este sentido, al desarrollo de edificaciones de madera sostenibles en Chile, proponiendo cambios normativos basados en evidencia científica para fomentar el uso de la madera en la construcción, considerando su potencial como material sostenible y adecuado para zonas de alta sismicidad (Santa María, y otros, 2019).

El análisis de Holz (2022) ofrece una visión actualizada, esta vez desde los índices de precios de los materiales de construcción, destacando la tendencia a la disminución en los precios pero con un aumento significativo en comparación con el período pre-pandemia. Esta tendencia es particularmente relevante para entender las dinámicas económicas que pueden influir en la decisión de adoptar nuevos métodos constructivos. Holz (2022) proporciona una base sólida para investigaciones futuras que busquen comprender mejor las dinámicas del mercado de la construcción, con un enfoque en la eficiencia de costos y la implementación de prácticas sostenibles en el sector. En general su estudio determina que:

- Se observa una tendencia general a la disminución en la tasa de crecimiento del precio de los materiales e insumos de construcción en Chile entre finales de 2021 y septiembre de 2022.
- Aunque hay una tendencia a la baja, los precios siguen mostrando un crecimiento anual significativo comparado con los niveles previos a la pandemia, lo cual podría reflejar impactos continuados de la misma en la cadena de suministro y en los costos de producción.
- Los datos sugieren que hay diferencias en la dinámica de precios entre diferentes tipos de materiales, lo que podría estar influenciado por factores como la disponibilidad de

recursos, cambios en la demanda, políticas comerciales y la economía global postpandemia.

- La madera y los productos de madera, aunque han visto disminuir su tasa de crecimiento del precio, siguen siendo de los que presentan un aumento más alto. Esto puede ser un indicativo del potencial de la construcción sostenible y el aumento en la demanda de materiales más ecológicos.
- Es importante entonces, finalmente, para los actores del sector estar al tanto de estas tendencias para poder tomar decisiones informadas relacionadas con la planificación, presupuesto y estrategias de construcción futuras.

Con la misma intención de comparar costos, otro estudio llevado a cabo por el Centro UC de Innovación en Madera, en colaboración con diversas instituciones públicas y privadas incluyendo la División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (DITEC) y el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), arroja luz sobre la realidad de los costos en la construcción con madera en Chile, un tema pertinente para cualquier investigación que busque explorar la viabilidad económica y ambiental de la construcción sustentable (Centro UC de Innovación en Madera, 2023).

El aporte de esta investigación, como antecedente de esta investigación, puede resumirse en los siguientes puntos:

- Se destaca la competitividad de costos de la construcción en madera en viviendas de uno y dos pisos en comparación con otras materialidades, como la albañilería y el acero galvanizado, lo que apoya su utilización por razones de eficiencia y rendimiento térmico.
- La investigación resalta cómo la incorporación de grados de industrialización en el proceso constructivo puede influir en la reducción de los tiempos de ejecución y, por ende, en la reducción de costos generales y de mano de obra, especialmente en edificaciones de altura media.
- El estudio revela que ciertas tecnologías estructurales y la normativa estructural o sísmica nacional pueden aumentar los costos en construcciones de madera de mediana altura, lo que sugiere la necesidad de revisión y adaptación de dichas normativas.
- Se enfatiza la importancia de incluir las externalidades ambientales, como los costos de operación y calefacción, en la evaluación económica de las construcciones en madera, lo cual podría traducirse en ahorros significativos a largo plazo y alinearse con objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.

La investigación resalta cómo la incorporación de grados de industrialización en el proceso constructivo puede influir en la reducción de los tiempos de ejecución y, por ende, en la reducción de costos generales y de mano de obra, especialmente en edificaciones de altura media. La investigación propone entonces, que el Estado desempeñe un papel central en la promoción de la construcción en madera, a través del apoyo a la industria del aserrío y la creación de políticas que incentiven su uso, incluyendo subsidios que cubran el costo neto de construcciones habitacionales de madera (Centro UC de Innovación en Madera, 2023).

Otra preocupación fundamental cuando se trata de construcciones en madera es cubierta por el trabajo presentado por el Área de Ingeniería de Protección Contra el Fuego (IPF) de DICTUC, dirigido por el ingeniero Rodrigo Aravena y solicitado por el Centro UC de Innovación en Madera de la Pontificia Universidad Católica de Chile, parte de un enfoque particular en la seguridad contra incendios y la construcción sostenible (Aravena, 2018).

Este estudio, realizado entre noviembre de 2017 y enero de 2018, tenía como objetivo verificar la posible asimilación de la resistencia al fuego de un sistema constructivo en base a los antecedentes de ensayos previos proporcionados. El alcance del informe se centra en determinar si los antecedentes existentes son suficientes para asignar una clasificación de resistencia al fuego a un conjunto de entrepiso que representa una modificación constructiva de otro previamente ensayado (Aravena, 2018). Los puntos clave de este informe que contribuyen a esta investigación avalan que, aunque no todos los criterios para la asimilación se cumplen completamente, el sistema constructivo evaluado puede ser asimilado a la clasificación F-60 en términos de resistencia al fuego. Esta conclusión puede servir como referencia para trabajos futuros que exploren la viabilidad de aplicar estos hallazgos en el diseño práctico y la implementación de sistemas constructivos sostenibles y seguros (Aravena, 2018).

Por último y en contrapeso a los estudios en madera que se han expuesto hasta aquí, la investigación elaborada por de Sutter Arroyo (2015), plantea un modelo innovador utilizando prefabricados de hormigón arquitectónico, destacando su rentabilidad y las ventajas en términos de reciclabilidad, propiedades térmicas y acústicas, así como una producción eficiente con materias primas locales. Este modelo se postula como una solución viable para abordar el déficit de vivienda, en particular para el estrato socioeconómico más bajo.

De Sutter Arroyo (2015), contribuye a un entendimiento de cómo los prefabricados de hormigón pueden ser optimizados para responder a las necesidades de vivienda económica y sustentable en Chile, proporcionando un antecedente significativo para futuras investigaciones que busquen abordar la construcción de viviendas con una perspectiva integral que considere los aspectos técnicos, económicos y sociales. Su tesis se ocupa de la problemática del déficit habitacional, enfocándose en los estratos socioeconómicos bajos, y propone una solución que no solo podría mejorar la oferta de viviendas subsidiadas sino también su calidad. Examina entonces, el marco de políticas gubernamentales y cómo han contribuido a mantener un mercado constante para viviendas subsidiadas, destacando la importancia de la interacción entre las políticas habitacionales y la innovación en la construcción.

Ofrece así, un análisis detallado de la oferta y demanda en el sector de la vivienda subsidiada, incluyendo el reconocimiento y aceptación de los sistemas de construcción no tradicionales, que es crucial para la formulación de estrategias de mercado y modelos de negocio sostenibles, llegando a identificar desafíos clave, como el transporte de elementos prefabricados, y cómo el modelo propuesto podría superar estos obstáculos, lo que sugiere áreas de oportunidad para la innovación y mejora en el sector.

En conjunto, los estudios revisados forman un cuerpo de conocimiento que establece un argumento sólido para la adopción de sistemas constructivos basados en madera y hormigón prefabricado. Al evaluar estos sistemas desde una perspectiva integral, que considera factores

ambientales, económicos, normativos y sociales, se abren caminos hacia un futuro de construcción sostenible y eficiente en la zona centro-sur de Chile.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Sostenibilidad en la construcción

La sostenibilidad hace referencia a la capacidad de atender las necesidades presentes sin limitar las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, lo que requiere un equilibrio entre el crecimiento económico, la conservación ambiental y el bienestar social. En el ámbito de los materiales de construcción, esto se traduce en una producción que minimice la huella de carbono, además de garantizar la durabilidad y la capacidad de reciclado o reutilización de los materiales. Es crucial realizar un análisis detallado que contemple el uso de recursos (tanto energéticos como materiales), la generación de residuos y emisiones de distintos tipos (incluyendo gases y residuos sólidos), y su impacto sobre los recursos naturales como el agua, la tierra y el aire, así como las repercusiones en las comunidades humanas, el paisaje y los ecosistemas (Ferrer García & Spairani Berrio, 2009).

La sostenibilidad en la construcción se refiere a la implementación de estrategias y prácticas que buscan minimizar el impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, mientras promueven la salud, la seguridad y el bienestar de sus ocupantes y de la comunidad en general. Este concepto ha evolucionado para incorporar no solo la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental, sino también la viabilidad económica y la equidad social, formando así los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: ambiental, económico y social (CCCS, 2024).

Desde la perspectiva ambiental, la sostenibilidad en la construcción se enfoca en reducir la huella ecológica de los edificios. Esto se logra mediante el uso eficiente de recursos, como agua y energía, y la selección de materiales que requieran menos energía en su fabricación y sean reciclables o biodegradables al final de su vida útil. Además, se busca minimizar la generación de residuos durante la construcción y promover prácticas que reduzcan la contaminación y mejoren la calidad del aire y del entorno natural (Romano Castañeda, y otros, 2022).

En el aspecto económico, la sostenibilidad implica diseñar y construir edificaciones que sean económicamente viables. Los edificios sostenibles tienden a tener menores costos operativos debido a su mayor eficiencia energética y menor necesidad de mantenimiento. Además, pueden ofrecer beneficios económicos a largo plazo, como un aumento en el valor de propiedad y mejores condiciones de habitabilidad, que pueden traducirse en una mayor demanda de mercado. También se considera la accesibilidad económica para asegurar que los beneficios de la construcción sostenible sean alcanzables para una amplia gama de población (de Burca, 2023).

Socialmente, la sostenibilidad aborda la necesidad de crear espacios que contribuyan al bienestar y la calidad de vida de los usuarios. Esto incluye la creación de ambientes saludables y seguros, con buena calidad del aire interior, iluminación natural adecuada y acceso a vistas y espacios verdes. Además, la construcción sostenible promueve la equidad al asegurar que todos los sectores de la sociedad se beneficien de la infraestructura de calidad y tengan acceso a viviendas asequibles y seguras (Romano Castañeda, y otros, 2022).

La integración de estos principios requiere un enfoque holístico en el diseño y la construcción, que considere no solo el producto final sino todo el proceso constructivo, desde la planificación y el diseño hasta la demolición o renovación. Esto implica colaboración entre diversos actores, incluyendo arquitectos, ingenieros, desarrolladores, autoridades y la comunidad, para asegurar que los proyectos de construcción contribuyan positivamente al entorno urbano y natural, y que sean sostenibles en términos de recursos, costos e impacto social.

La sostenibilidad en proyectos de vivienda de interés social es crucial debido a su capacidad de generar beneficios a largo plazo tanto para los ocupantes como para la sociedad en general. La implementación de principios sostenibles en este tipo de proyectos no solo mejora la calidad de vida de los residentes sino que también contribuye significativamente a la protección ambiental y la eficiencia económica (Méndez Ramírez, Becerril Sánchez, & Gutiérrez Chaparro, 2021).

Uno de los aspectos más importantes de la sostenibilidad en vivienda social es la reducción de la pobreza energética. Las viviendas sostenibles suelen ser más eficientes en términos energéticos, lo que reduce los costos de energía para los residentes. Esto es especialmente valioso en el contexto de vivienda de interés social, donde los costos de energía pueden representar una parte significativa de los ingresos limitados de los hogares. Al disminuir estos costos, se incrementa la disponibilidad de recursos para otras necesidades esenciales como alimentación, salud y educación (Carrizo, Azqueta, Strier, & Gil, 2021).

En el escenario actual de Chile, la provisión de vivienda emerge como un desafío complejo, marcado por una serie de factores urbanos que han capturado el interés público en los últimos años. Más allá del conocido déficit de vivienda, tanto en términos cualitativos como cuantitativos, se suman otras dimensiones que han complicado la situación. Entre estos se incluyen: Un significativo nivel de hacinamiento que, según la Encuesta Socioeconómica Nacional CASEN de 2017, afecta a un 16.8% de las familias en el quintil más bajo, lo que representa aproximadamente 77.000 hogares; el incremento notable de asentamientos informales, con 47 mil familias viviendo en campamentos según el último catastro del Ministerio de Vivienda y Urbanismo; un notable aumento en la migración, que ha visto un incremento de 200 mil migrantes en 2002 a más de 1 millón en 2018, lo cual plantea un reto crítico para la inclusión en las políticas urbanas y evitar la segregación; y los impactos previstos del cambio climático, que se anticipa tendrán consecuencias graves dada la geografía de Chile, afectando principalmente a las zonas urbanas (Banco Mundial, 2020).

Adicionalmente, la baja productividad en el sector de la construcción se destaca como un desafío relevante para la agenda urbana. A nivel mundial, la productividad en construcción

ha mostrado un crecimiento mínimo del 1% en las últimas dos décadas, manteniéndose como uno de los sectores menos productivos. En el contexto chileno, esta situación se agudiza, mostrando tendencias de estancamiento o incluso decrecimiento (Banco Mundial, 2020).

Además, la sostenibilidad ambiental en la construcción de viviendas de interés social implica el uso de materiales eco-amigables y técnicas de construcción que minimizan el impacto ambiental. Esto incluye la gestión eficiente de los recursos naturales, como el agua y los materiales de construcción, y la minimización de la contaminación durante el proceso constructivo. Tales prácticas no solo protegen el medio ambiente sino que también aseguran que las viviendas sean saludables y seguras para sus ocupantes, evitando problemas como la mala calidad del aire interior o la presencia de materiales tóxicos (CCCS, 2024).

Socialmente, la construcción de viviendas sostenibles de interés social fomenta la inclusión y la equidad. Estas viviendas están diseñadas para ser accesibles y adaptarse a las necesidades de diversos grupos poblacionales, incluyendo familias con bajos ingresos, personas con discapacidades y ancianos. Esto se logra a través de diseños flexibles y adaptativos que pueden ajustarse a diferentes configuraciones familiares y necesidades de movilidad (Secretaría de Vivienda de Argentina, 2019).

La integración de espacios verdes y áreas comunitarias en proyectos de vivienda de interés social también juega un papel crucial en la promoción del bienestar social. Estos espacios no solo mejoran la estética y el valor de las propiedades, sino que también proporcionan áreas para la recreación y el esparcimiento, fomentando la cohesión comunitaria y la interacción social entre los residentes.

Económicamente, las viviendas sostenibles de interés social son una inversión inteligente a largo plazo. Aunque el costo inicial puede ser más alto debido a la incorporación de tecnologías sostenibles y materiales de mejor calidad, los ahorros en costos operativos y de mantenimiento compensan estas inversiones iniciales a lo largo del tiempo. Además, las viviendas sostenibles tienden a tener una mayor durabilidad y menor necesidad de reparaciones frecuentes, lo que reduce los costos futuros y aumenta la estabilidad financiera de los hogares (de Burca, 2023).

La resiliencia es otro concepto que se entiende como la capacidad de anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse de impactos adversos, tales como los provocados por el cambio climático, minimizando de este modo los daños y disfunciones. Esta definición implica la necesidad de utilizar materiales que soporten cambios extremos en las condiciones ambientales, tales como altas temperaturas, aumentos de precipitaciones o sequías prolongadas. Estos materiales, ya sean innovaciones recientes o de uso histórico en la construcción, son clave para proporcionar a los edificios características alineadas con la resiliencia (Rakes, y otros, 2023).

Conforme a Cortés Cely (2016), la investigación académica ha identificado ciertas variables esenciales necesarias para evaluar las propiedades de los materiales en arquitectura y construcción y determinar el grado de resiliencia que pueden conferir a las estructuras. Estas variables permiten una comprensión profunda de cómo los materiales contribuyen a la

capacidad de un edificio para soportar y adaptarse a los desafíos ambientales. Se categorizan en propiedades físicas, mecánicas, eléctricas, térmicas y ambientales. Dentro de las propiedades físicas, se consideran características mecánicas como la elasticidad y la densidad, que influyen en la capacidad del material para resistir y absorber impactos. Las propiedades mecánicas se atribuyen a la elasticidad de los materiales. Las propiedades eléctricas, por su parte, incluyen el aislamiento, importante para la eficiencia energética y protección en entornos variables. Las propiedades térmicas más importantes son dilatación y/o conductividad. Finalmente, las propiedades ambientales engloban la no toxicidad, reciclabilidad, reutilización y biodegradabilidad de los materiales, que son fundamentales para minimizar el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de las construcciones.

La eficiencia energética en los materiales de construcción alude a su capacidad para reducir el consumo de energía a lo largo de todo su ciclo de vida, que incluye la producción, transporte, instalación, mantenimiento y demolición. Este aspecto es crucial para disminuir la huella de carbono de las infraestructuras y, por ende, para contribuir a la mitigación del cambio climático, según Pascual Román (2014).

La evaluación comparativa entre materiales tradicionales y aquellos más innovadores resalta la necesidad de un enfoque holístico que no solo contemple las características técnicas y funcionales de los materiales, sino también su impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. Los materiales innovadores, en particular los que resultan de procesos de reciclaje y tecnologías avanzadas, demuestran un potencial considerable para optimizar la sostenibilidad, resiliencia y eficiencia energética de las infraestructuras. No obstante, es imprescindible llevar a cabo una evaluación exhaustiva de cada material, considerando factores como su disponibilidad, coste, impacto ambiental y compatibilidad con infraestructuras existentes, según indican Sánchez y otros (2019).

La transición hacia materiales más sostenibles y eficientes desde el punto de vista energético requiere de innovaciones tecnológicas, así como de cambios en las políticas, regulaciones y prácticas constructivas. Por tanto, resulta esencial fomentar la colaboración entre investigadores, fabricantes de materiales, diseñadores, autoridades reguladoras y gestores de redes de agua para facilitar la implementación de estas soluciones innovadoras (Wood, 2024).

La comparación entre los materiales tradicionales y los innovadores ilustra un escenario complejo; mientras los primeros han sido fundamentales para el desarrollo de infraestructuras debido a su resistencia y funcionalidad, a menudo presentan desventajas en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia energética. Por el contrario, los materiales innovadores, aunque puedan ser inicialmente más costosos y enfrenten desafíos de disponibilidad y experiencia en su implementación, ofrecen mejoras sustanciales en términos de sostenibilidad, adaptación al cambio climático y eficiencia energética (Quinceno Peláez, 2023).

Es crucial una transición gradual hacia materiales más sostenibles y eficientes, pero sin descuidar las fortalezas y limitaciones de los materiales tradicionales. La integración de nuevas tecnologías y materiales innovadores, junto con una valoración cuidadosa de los materiales convencionales, permitirá desarrollar proyectos de construcción que no solo sean

eficientes y resilientes, sino también sostenibles a largo plazo. Para lograr este objetivo, es fundamental considerar los siguientes aspectos:

- **Innovación en Procesos de Producción:** Se busca mejorar los procesos de producción de los materiales tradicionales para disminuir su impacto ambiental. Esto implica optimizar el consumo de energía y reducir las emisiones durante la producción de metales y cemento, además de avanzar en el desarrollo de métodos de reciclaje más eficaces para materiales como plásticos y PVC.
- **Normativas y Políticas de Sostenibilidad:** Es crucial establecer normativas y políticas que promuevan el uso de materiales sostenibles y fomenten la inversión en la investigación y el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías, acelerando así la transición hacia infraestructuras más sostenibles.
- **Implementación de Tecnologías Limpias:** La incorporación de tecnologías limpias en la fabricación de materiales puede disminuir de manera significativa la huella de carbono. Esto es aplicable tanto a materiales tradicionales como a innovadores, garantizando que su producción y utilización sean lo más sostenibles posibles.
- **Análisis de Ciclo de Vida (ACV):** La realización de análisis de ciclo de vida completos para todos los materiales permite una evaluación objetiva de su impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final. Este análisis debe orientar la selección de materiales en proyectos de construcción y en la renovación de redes de agua y alcantarillado.
- **Desarrollo de Materiales Compuestos y Mejorados:** La investigación y el desarrollo de nuevos materiales compuestos, que integran las propiedades ventajosas de diversos materiales, pueden proporcionar soluciones novedosas.
- **Educación y Capacitación:** Es fundamental la formación de profesionales en el manejo de materiales innovadores y sostenibles. Entender sus propiedades, aplicaciones y beneficios puede promover su adopción y optimizar su implementación en proyectos de infraestructura.

Según Nor Azmi y otros, (2012), los elementos esenciales para una construcción sostenible ya están integrados en la gestión de la construcción, incluyendo aspectos como el tiempo, los costos, la calidad, la seguridad, la protección ambiental y la salud. Aunque a primera vista estos componentes pueden parecer dispares o inconexos, es crucial mantener un equilibrio positivo entre ellos para lograr resultados óptimos.

Esta idea subraya que la construcción sostenible no se trata solo de considerar el impacto ambiental, sino que también involucra una gestión efectiva de múltiples factores que a menudo se consideran independientes unos de otros. Por ejemplo, reducir los tiempos de construcción no solo es una cuestión de eficiencia, sino que también puede disminuir la cantidad de desechos y la exposición de los trabajadores a condiciones potencialmente

peligrosas, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y la seguridad laboral. De igual manera, controlar los costos puede influir directamente en la capacidad de implementar soluciones de alta calidad y seguras, lo que a su vez tiene repercusiones en la sostenibilidad a largo plazo de un proyecto.

Por lo tanto, la gestión exitosa de un proyecto de construcción sostenible depende de cómo estos elementos interactúan y se equilibran entre sí, asegurando que la mejora en un área no cause problemas en otra. Este enfoque holístico es fundamental para promover prácticas de construcción que sean verdaderamente sostenibles en todos los aspectos.

2.2.2. *Sistemas constructivos industrializados*

La historia de los sistemas constructivos industrializados refleja según García Marquina, (2013), un desarrollo evolutivo influenciado por factores tecnológicos, económicos y sociales. A continuación, se detalla el desarrollo histórico según este autor:

- **Orígenes y Evolución Temprana:** La transición de técnicas de construcción tradicionales a sistemas basados en la industrialización se considera inevitable, impulsada por necesidades urgentes de vivienda tras eventos como la Segunda Guerra Mundial, y por avances en tecnología y materiales como el hormigón y la madera. Este cambio representa un ajuste cultural y metodológico en la construcción, similar a otros campos de actividad humana, donde la adaptación a nuevos métodos y procesos ha sido esencial para el progreso.
- **Desarrollo durante la Revolución Industrial:** La industrialización en la construcción comenzó a ganar impulso con la Revolución Industrial, marcando el comienzo de la era moderna. Aunque existieron instancias de producción prefabricada antes de este periodo, no fue hasta la revolución que estos métodos comenzaron a sistematizarse y a reconocerse como una tendencia viable y alternativa.
- **Ejemplos Históricos:** Innovaciones significativas incluyen el trabajo de Leonardo da Vinci en el siglo XVI, quien planificó ciudades en Francia usando módulos prefabricados. Durante el siglo XVI, en contextos militares entre Francia e Inglaterra, se desarrollaron estructuras prefabricadas para uso militar que podían montarse y desmontarse con facilidad.
- **Desarrollos en Estados Unidos:** En Estados Unidos, la introducción del sistema Balloon Frame en 1833 por George W. Snow marcó un desarrollo importante, facilitando la construcción de edificios rápidos y económicos. Este sistema contribuyó a la expansión rápida de ciudades como Chicago y San Francisco, transformando la construcción en una industria más que un oficio.
- **Impacto de la Prefabricación Temprana:** Antes de la Revolución Industrial, ya existían ejemplos de construcción con criterios industriales. Estos incluyen construcciones prefabricadas en Canadá e Inglaterra que fueron trasladadas y

montadas en otros lugares, demostrando la viabilidad de la prefabricación incluso antes de su reconocimiento formal en la industria.

Aunque la construcción industrializada ha demostrado su eficacia a lo largo del tiempo, enfrenta desafíos en cuanto a la percepción de calidad y adaptabilidad a diseños personalizados. La historia de la construcción industrializada refleja una búsqueda continua de eficiencia, adaptabilidad y mejora en la calidad de la construcción, impulsada por la evolución de las necesidades sociales y los avances tecnológicos. Este desarrollo histórico demuestra cómo los sistemas constructivos industrializados han evolucionado de experimentos aislados a una componente integral de la construcción moderna, adaptándose constantemente a las necesidades cambiantes y los avances en tecnología.

A lo largo del tiempo, la industria de la construcción ha sido etiquetada como intensiva en mano de obra, peligrosa y contaminante. Las actividades de construcción dependen en gran medida de métodos tradicionales que incluyen el uso de encofrados y una gran cantidad de trabajos húmedos. La calidad del resultado final está altamente ligada a la habilidad de los trabajadores calificados y semi-calificados. Además, esta industria registra los niveles más altos de accidentes laborales y muertes. Las actividades de construcción también son intrínsecamente perjudiciales para el medio ambiente, generando molestias ambientales como ruido, polvo, escurrimientos fangosos y grandes cantidades de residuos (Nor Azmi et al., 2012).

Los sistemas constructivos industrializados representan un enfoque moderno y eficiente en el campo de la construcción, caracterizado por el uso intensivo de procesos industrializados y tecnologías avanzadas. Este método se centra en la prefabricación de componentes en un entorno controlado, lo que permite una construcción más rápida, limpia y precisa en el sitio final.

Los sistemas constructivos industrializados representan una evolución significativa en las técnicas de construcción, ofreciendo eficiencia, calidad y sostenibilidad. Estas características los hacen particularmente atractivos para proyectos que buscan optimizar recursos, reducir impactos ambientales y acelerar los tiempos de entrega (Vega Clemente, 2015). Las características generales de los sistemas constructivos industrializados se incluyen en la tabla 1.

Tabla 1: Características generales de los sistemas constructivos industrializados

1. Prefabricación

- Una de las características distintivas de los sistemas constructivos industrializados es la prefabricación de componentes o módulos completos en una fábrica. Esto incluye elementos estructurales, paneles de pared, techos y módulos completos de habitaciones, que luego se transportan al sitio de construcción para su ensamblaje. La prefabricación permite un control de calidad más riguroso, reduce los desperdicios de materiales y minimiza las interrupciones debidas a condiciones climáticas adversas.

2. Eficiencia y rapidez de construcción

- Al trasladar gran parte del proceso de construcción a un ambiente de fábrica, los sistemas industrializados reducen significativamente los tiempos de construcción. El ensamblaje de componentes prefabricados en el sitio puede realizarse en cuestión de días o semanas, en comparación con los meses que a menudo requiere la construcción tradicional. Esto es crucial para proyectos con plazos estrictos y puede reducir significativamente los costos laborales en el sitio.

3. Reducción de residuos

- La eficiencia del proceso de prefabricación permite un uso más preciso de los materiales, lo que resulta en una reducción significativa de residuos. Además, los materiales sobrantes en la fábrica pueden reciclarse o reutilizarse de manera más efectiva, contribuyendo a una construcción más sostenible.

SOLO USO ACADÉMICO

4. Control de calidad mejorado

- La fabricación en un entorno controlado mejora la calidad de los componentes de construcción. Los procedimientos estandarizados y las condiciones de fabricación controladas aseguran que cada elemento cumpla con los estándares de calidad antes de su instalación, reduciendo el riesgo de defectos relacionados con la mano de obra y los materiales.

5. Sostenibilidad

- Los sistemas constructivos industrializados son generalmente más sostenibles que los métodos de construcción tradicionales. La eficiencia en el uso de materiales, la reducción de residuos y la capacidad de incorporar tecnologías de eficiencia energética durante el proceso de fabricación contribuyen a la sostenibilidad general del proyecto. Además, la rapidez en la construcción reduce el consumo de energía y las emisiones asociadas con los procesos de construcción prolongados.

6. Flexibilidad y adaptabilidad

- Aunque los componentes son prefabricados, los sistemas constructivos industrializados ofrecen una considerable flexibilidad de diseño. Los módulos pueden diseñarse para ser ensamblados de diferentes maneras, permitiendo una variedad de configuraciones arquitectónicas. Esto los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones, desde viviendas unifamiliares hasta edificios comerciales de gran altura.

7. Costos predictivos

- Los costos en los sistemas constructivos industrializados son más predecibles en comparación con los métodos de construcción tradicionales. La estandarización de procesos y la reducción de imprevistos en el sitio debido al clima o a errores de construcción permiten una estimación más exacta del costo total del proyecto desde sus etapas iniciales.

Fuente: Elaboración propia sobre Vega Clemente (2015)

Los sistemas constructivos industrializados, también conocidos como construcción modular o prefabricada, han ganado popularidad en Chile debido a sus numerosas ventajas, especialmente en términos de eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, como cualquier enfoque de construcción, también enfrentan ciertas limitaciones y desafíos que son importantes de considerar.

Para del Coz Díaz y Suárez Sierra (2024), las ventajas de la construcción industrializada son:

- **Eficiencia Energética y Sostenibilidad:** La construcción industrializada permite integrar soluciones ecoeficientes desde el inicio del proceso de diseño, utilizando materiales sostenibles que son reciclables y reutilizables. Este enfoque alinea el sector de la construcción con los principios de desarrollo sostenible, enfocándose en minimizar el impacto ambiental.
- **Calidad y Seguridad Mejoradas:** La fabricación en entornos controlados mejora la calidad y la seguridad de los componentes de construcción. Esto garantiza que los

edificios no solo cumplan con los estándares de seguridad modernos, sino que también ofrecen una mayor durabilidad y resistencia.

- **Reducción de Costes y Tiempos de Construcción:** Al trasladar gran parte del proceso constructivo a un ambiente de fábrica, se reducen significativamente los tiempos de construcción. Esto también permite un control más estricto de los costos, haciendo el proceso más predecible y eficiente.
- **Innovación y Competitividad:** La industrialización fomenta la adopción de nuevas tecnologías y procesos, lo que puede aumentar la competitividad del sector. Esto incluye la posibilidad de personalización en masa, donde se pueden adaptar los productos para satisfacer las necesidades específicas de los consumidores sin incurrir en costos excesivos.

Las desventajas en cambio, enumeradas por los mismos autores serían:

- **Alto Coste Inicial:** Aunque puede haber ahorros a largo plazo, la inversión inicial en tecnología y plantas de fabricación puede ser considerable. Esto puede ser un obstáculo para la adopción de la construcción industrializada, especialmente en mercados donde el capital inicial es limitado.
- **Resistencia al Cambio:** Existe cierta resistencia dentro del sector de la construcción a adoptar métodos industrializados, en parte debido a la tradición y a la percepción de que estos métodos podrían ser menos flexibles o impersonales.
- **Dependencia de la Tecnología:** La construcción industrializada depende en gran medida de la tecnología y la maquinaria específica, lo que puede hacer que el sector sea vulnerable a interrupciones tecnológicas o falta de mantenimiento adecuado.
- **Complejidad Logística:** El transporte y la logística de los componentes prefabricados desde la fábrica hasta el sitio de construcción pueden presentar desafíos significativos, especialmente en ubicaciones remotas o accesos difíciles.
- **Impacto del Entorno Construido:** La construcción industrializada debe considerar cuidadosamente el impacto en el entorno construido, asegurando que los nuevos desarrollos se integren de manera sostenible y armoniosa con su entorno.

Es así que, mientras que la construcción industrializada ofrece numerosas ventajas en términos de eficiencia, calidad y sostenibilidad, también presenta desafíos que deben ser gestionados cuidadosamente para maximizar sus beneficios y asegurar su viabilidad a largo plazo. Este enfoque requiere entonces, un cambio significativo tanto en la mentalidad como en las prácticas operativas dentro del sector de la construcción (del Coz Díaz & Suárez Sierra, 2024).

2.2.3. Paneles de madera como material constructivo

El concepto de productos de ingeniería en madera se refiere a aquellos productos fabricados a partir de piezas de madera aserrada, chapas, partículas o fibras de madera, unidas mediante adhesivos u otros métodos, resultando en características superiores a la madera sólida en términos de uniformidad en propiedades mecánicas y estabilidad dimensional. Estos productos pueden fabricarse en una amplia variedad de dimensiones (Gysling, et al., 2021).

Los sistemas de prefabricación en madera se componen de diversos elementos que van desde la materia prima hasta módulos completos. Estos sistemas predominantes en la industrialización de la construcción en madera son lineales, paneles y modulares. El sistema lineal utiliza elementos de madera laminada encolada procesados industrialmente para un fácil montaje en obra. El sistema de paneles se compone de estructuras planas fabricadas industrialmente para ser ensambladas en obra, permitiendo edificar hasta seis pisos con entramado liviano o estructuras más altas con madera sólida. El sistema modular consiste en módulos tridimensionales ensamblados en fábrica y luego montados en obra, típicamente desarrollados con entramado ligero aunque también con madera sólida. En Europa, es común la técnica híbrida que combina estos sistemas para aprovechar sus ventajas (Zilic, et al., 2019).

En el ámbito de la construcción, los paneles de madera han surgido como una alternativa sostenible y eficiente frente a los métodos tradicionales. Su uso ha aumentado significativamente debido a sus propiedades estructurales, estéticas y ecológicas. Como material constructivo ofrecen múltiples ventajas, especialmente en el contexto de la construcción de viviendas unifamiliares de interés social en la zona centro-sur de Chile. Su sostenibilidad, eficiencia energética, y rapidez de construcción los posicionan como una opción prometedora frente a los métodos tradicionales. No obstante, es necesario abordar los desafíos asociados a su vulnerabilidad al fuego y la humedad, así como evaluar los costos iniciales en relación con los beneficios a largo plazo.

La construcción en madera a menudo requiere la integración de otros materiales como hormigón para fundaciones y metal para herrajes y conectores, aunque las tolerancias de manufactura entre estos materiales difieren. La prefabricación en madera alcanza altos niveles de precisión dimensional, lo que significa que la industrialización de la construcción en madera también depende de la sofisticación de las industrias del hormigón y del acero (Zilic, et al., 2019). Los paneles de madera son entonces, elementos prefabricados de diversos tipo (Tabla 2), compuestos por capas de madera ensambladas y unidas mediante adhesivos o sistemas de fijación mecánica.

Tabla 2: Tipos de paneles de madera utilizados en la construcción

Contrachapado:

- Compuesto por varias capas de chapa de madera unidas en ángulos rectos entre sí, lo que le confiere alta resistencia y estabilidad dimensional.

OSB (Oriented Strand Board):

- Formado por virutas de madera orientadas en diferentes direcciones y unidas con resinas, utilizado principalmente en revestimientos y estructuras de paredes.

CLT (Cross-Laminated Timber):

- Consiste en capas de madera maciza dispuestas perpendicularmente, proporcionando alta resistencia estructural y capacidad de carga.

Fuente: Elaboración propia sobre Zilic, et al., (2019)

La madera laminada encolada (Glulam) se obtiene al unir varias capas de madera con adhesivo, con las fibras de todas las capas orientadas paralelamente. Las piezas de madera, de entre 25 y 45 mm de espesor, se clasifican previamente por su resistencia y se ensamblan con uniones dentadas para formar elementos de tamaño variable. En Chile se utiliza comúnmente madera de pino radiata para este producto. La madera contralaminada (CLT) es un panel sólido hecho de capas de tablas de madera estructural, apiladas con las fibras en direcciones alternas, unidas con adhesivos y prensadas. Es muy resistente y se usa en paredes, pisos y techos, ofreciendo buen desempeño acústico y térmico. Compite con materiales tradicionales de construcción en altura, como hormigón y acero (Gysling, et al., 2021).

Las vigas doble T (I-Joists) tienen una sección transversal en forma de "I" y se fabrican uniendo dos alas a un alma, usando madera aserrada estructural, madera laminada (LVL) o madera estructural compuesta (SCL) para las alas, y tableros contrachapados u OSB para el alma. Son eficientes en el uso de madera y se utilizan en pisos y techos residenciales. La madera estructural compuesta (SCL) incluye productos como LVL, PSL, LSL y OSL, fabricados uniendo pequeñas piezas de madera con adhesivo, calor y presión, siendo estables y capaces de soportar grandes cargas. LVL, por ejemplo, se utiliza en vigas y dinteles, mientras que PSL se usa en vigas y columnas (Gysling, et al., 2021).

Los paneles SIP (Structural Insulated Panels) consisten en un núcleo de espuma de poliestireno de alta densidad recubierto por dos piezas de OSB. Son rápidos de instalar y reducen los residuos de construcción, ofreciendo ventajas en términos de tiempo y costo. Las cerchas de madera son estructuras reticuladas usadas para techos, compuestas por piezas unidas en los extremos, distribuyendo las cargas de la techumbre y soportando el peso del viento y la nieve. En Chile, las conexiones pueden ser mediante placas dentadas o clavos. Las vigas reticuladas son estructuras formadas por barras unidas para funcionar como una viga grande, usadas en pisos y techos no habitacionales. Las barras suelen formar triángulos para distribuir las cargas (Gysling, et al., 2021).

Los productos de uso no estructural incluyen por su parte madera aserrada no estructural, tableros de fibras (HDF y MDF), tableros de partículas (PB y MDP), tableros contrachapados

no estructurales, puertas y ventanas de madera, y molduras. Estos productos se utilizan principalmente en carpintería y decoración (Gysling, et al., 2021).

La versatilidad de la madera y la experiencia en su desarrollo han dado lugar a una gran diversidad de soluciones de construcción industrializada en madera. Las principales familias de estructuras son: poste y viga, entramado y sólida. El sistema poste y viga utiliza elementos lineales de madera laminada para soportar cargas verticales mediante postes, pilares y vigas, y cargas laterales mediante diagonales y planos rígidos. El entramado conforma paneles prefabricados que transmiten cargas laterales y horizontales, compuestos por elementos lineales de madera sólida y placas arriostrantes como OSB o contrachapado. El sistema sólido se basa en elementos de madera sólida, tradicionalmente troncos aserrados, evolucionando hacia madera laminada y paneles de madera contralaminada (CLT), madera laminada clavada (NLT) y madera laminada atarugada (DLT) con propiedades mecánicas y físicas específicas (Tabla 3) (Zilic, et al., 2019).

Tabla 3: Propiedades mecánicas y físicas que hacen a los paneles de madera adecuados para la construcción

Resistencia y Durabilidad: <ul style="list-style-type: none">• Los paneles de madera, especialmente los CLT, tienen una alta capacidad de carga y resistencia a la flexión, compresión y tracción.
Aislamiento Térmico y Acústico: <ul style="list-style-type: none">• La madera tiene propiedades aislantes naturales, ofreciendo un buen rendimiento térmico y acústico en las edificaciones.
Peso Ligero: <ul style="list-style-type: none">• Comparado con otros materiales de construcción, la madera es significativamente más liviana, facilitando su transporte y manejo en obra.
Sostenibilidad: <ul style="list-style-type: none">• La madera es un recurso renovable, y su uso responsable contribuye a la reducción de la huella de carbono en la construcción.

Fuente: Elaboración propia sobre Zilic, et al., (2019)

La madera es un material ecológico que captura y almacena carbono durante su crecimiento. El uso de paneles de madera en la construcción contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la eficiencia energética de las viviendas construidas con paneles de madera es superior debido a sus propiedades aislantes, lo que reduce los costos de calefacción y refrigeración.

Las tendencias internacionales en la construcción en madera apuntan hacia el uso de productos de ingeniería como CLT y madera laminada, cuya producción ha aumentado significativamente en las últimas décadas. El mercado global de madera laminada se valoró en USD 4.760 millones en 2016 y se prevé que crezca a una tasa compuesta anual de 5.9% durante los próximos años. La creciente preocupación por la sostenibilidad y la conciencia sobre la madera como material de construcción son factores clave que impulsan este mercado (Zilic, et al., 2019).

Los sistemas constructivos basados en paneles de madera permiten una construcción más rápida y eficiente. La prefabricación de los paneles en fábrica reduce el tiempo de construcción en el sitio, minimiza los desperdicios y mejora la calidad del producto final. Esta eficiencia es crucial en proyectos de viviendas de interés social donde la rapidez de entrega es un factor determinante.

Un sistema constructivo se define en todo caso como el conjunto de materiales y componentes combinados racionalmente bajo ciertas técnicas para construir una edificación, creando así un objeto arquitectónico. Los sistemas constructivos de madera se dividen en Sistemas de Entramado Ligero y Sistemas de Entramado Pesado (Gysling, et al., 2021).

Los Sistemas de Entramado Ligero utilizan elementos estructurales básicos como vigas, pilares y postes. Los tipos más comunes son el sistema de poste y viga y el sistema marco plataforma. El sistema de poste y viga se utiliza para tramos largos en viviendas de dos pisos, permitiendo grandes superficies libres. Este sistema se basa en postes empotrados que reciben los esfuerzos estructurales a través de vigas maestras, con un enmarcado adicional que facilita revestimientos y terminaciones. Las uniones se realizan con herrajes metálicos. El sistema marco plataforma, evolución del sistema Ballon Frame, es popular a nivel mundial. Consiste en levantar la estructura de cada piso independientemente, interrumpiendo la continuidad de los pilares entre pisos, mejorando la reacción ante incendios y permitiendo construcciones más rápidas y económicas (Gysling, et al., 2021).

Los Sistemas de Entramado Pesado utilizan por su parte grandes paneles sólidos de madera para muros, pisos y techos. Los productos más comunes son CLT, NLT, LVL y madera laminada encolada. El sistema CLT consiste en paneles de capas de madera unidas perpendicularmente, ofreciendo alta resistencia y adaptabilidad. Los paneles prefabricados permiten aplicaciones en proyectos de altura y edificación modular. En Chile, el CLT se ha utilizado en jardines infantiles y proyectos académicos. La madera laminada encolada, producto industrial, permite piezas de diversas formas y dimensiones, facilitando diseños arquitectónicos complejos y útiles en edificaciones que requieren amplios espacios libres. Su longitud está limitada por el transporte, pero puede unirse en obra (Gysling, et al., 2021).

Existen por otro lado, dos métodos principales de construcción industrializada: los Sistemas Cerrados y los Sistemas Abiertos. Los Sistemas Cerrados resuelven todo un edificio con componentes no intercambiables entre fábricas, como paneles prefabricados y módulos tridimensionales, los Sistemas Abiertos por su parte, industrializan componentes intercambiables entre distintas fábricas, facilitando uniones universales (Gysling, et al., 2021).

Los paneles de madera ofrecen así, una gran flexibilidad en el diseño arquitectónico. Pueden ser utilizados en diversas configuraciones y adaptarse a diferentes estilos y necesidades constructivas. Esta adaptabilidad permite una personalización y optimización del espacio habitable, mejorando la calidad de vida de los habitantes.

Uno de los principales desafíos de la construcción con madera es su vulnerabilidad al fuego y a la humedad. Sin embargo, la aplicación de tratamientos ignífugos y protectores contra la humedad puede mitigar estos riesgos. Es esencial implementar medidas de seguridad y mantenimiento adecuadas para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras de madera.

Aunque los paneles de madera pueden reducir costos a largo plazo debido a su eficiencia energética, el costo inicial de los materiales y la prefabricación puede ser más elevado en comparación con otros métodos tradicionales de construcción. No obstante, esta inversión puede ser justificada por los beneficios medioambientales y de calidad que ofrece la madera.

En la zona centro-sur de Chile, las viviendas de interés social representan una necesidad crítica debido a la creciente demanda de viviendas asequibles y de calidad. Los paneles de madera se presentan como una solución viable y sostenible, alineada con las políticas de desarrollo sostenible y eficiencia energética del país. En la última década, el sector forestal en Chile ha avanzado significativamente en su producción y contribución a la economía nacional, basado en el consumo de madera principalmente de plantaciones de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, que representan el 98,6% del consumo total de madera en troza en la industria nacional. Este crecimiento se ha logrado gracias a la integración vertical entre el bosque y la industria, especialmente entre las grandes empresas, lo que ha generado economías de escala, eficiencia y dinamismo en los procesos (Schueftan, et al., 2021).

Sin embargo, a pesar de este desarrollo, el bosque nativo y sus productos madereros han perdido relevancia en los mercados tradicionales nacionales. Entre 2019 y 2020, la participación de especies nativas en el consumo industrial de madera en troza disminuyó un 21,2%, alcanzando un mínimo de 0,6%. Esta disminución se debe a diversos factores como la calidad del recurso nativo, la incertidumbre en el abastecimiento, aspectos legales y de accesibilidad, la falta de valor agregado e innovación en los productos, y una infraestructura deficiente que incrementa los costos de cosecha y transporte (Schueftan, et al., 2021).

Existen diversos proyectos en Chile que han implementado con éxito el uso de paneles de madera en la construcción de viviendas unifamiliares. Estos proyectos demuestran la viabilidad técnica y económica de este material, así como su aceptación social. Los resultados han mostrado mejoras significativas en términos de confort térmico, acústico y estético, además de una reducción en los tiempos de construcción.

La entrada de materiales sustitutos ha acelerado sin embargo la pérdida de participación de las maderas nativas, especialmente en el sector de la construcción, así como en los mercados de muebles, puertas, ventanas y decoración. Grandes intermediarios como SODIMAC, EASY y MCT prefieren materiales como metal, plásticos y fibrocemento debido a su disponibilidad, innovación en sistemas constructivos, estandarización, certificación y menor necesidad de mantenimiento (Schueftan, et al., 2021).

A pesar de las ventajas comparativas de la madera en la construcción, existe una evidente ineficiencia de mercado. La madera posee una resistencia similar a la del hormigón reforzado,

es de baja densidad, y ofrece un excelente desempeño como aislante térmico, lo que la hace ideal para la construcción industrial. Además, las viviendas de madera regulan la humedad, absorben el sonido, son rápidas de construir y presentan buen comportamiento sísmico. Estos beneficios han impulsado el uso de madera en la construcción de edificios de varios pisos en distintos países, promoviendo la sustentabilidad y el desarrollo a través de técnicas constructivas innovadoras. Además de todo lo expuesto, los atributos de sustentabilidad de la madera han sido evaluados mediante sistemas de calificación y certificación de sustentabilidad y eficiencia energética, que miden el impacto ambiental, económico y social de los proyectos. (Schueftan, et al., 2021).

2.2.4. Prefabricación de hormigón

La prefabricación de hormigón ha demostrado ser un método de construcción altamente eficiente y efectivo, especialmente en el contexto de la construcción de viviendas unifamiliares de interés social en la zona centro-sur de Chile. Este método se define por la fabricación de componentes de construcción en un entorno controlado, como una fábrica, y su posterior ensamblaje en el sitio de construcción. Este proceso permite un control de calidad superior y una reducción significativa en el tiempo y los costos de construcción.

Después de la Primera Guerra Mundial, debido a la escasez de materiales y mano de obra, se comenzó a dar mayor importancia a los prefabricados preesforzados. A mediados del siglo XX, inspirados por la industria automotriz, algunos arquitectos diseñaron casas modulares ensambladas en planta. La Segunda Guerra Mundial impulsó aún más el uso de prefabricados, y en Francia, la necesidad de 250 mil viviendas anuales llevó al desarrollo de nuevos sistemas de prefabricación, resultando en la creación de fábricas como la de Montesson en 1952, la primera en ofrecer un sistema industrializado de paneles prefabricados (de Sutter Arroyo, 2015).

En los países del este de Europa, durante dos décadas, se desarrollaron sistemas de prefabricados con elementos de hormigón en paneles. Estos sistemas eran inflexibles, demandando proyectos de al menos mil viviendas con elementos de tamaños específicos y repetitivos, lo cual llevó a la creación de los conocidos "monstruos de hormigón" europeos. Para 1970, los países de la Unión Europea cambiaron su enfoque, construyendo viviendas unifamiliares de mayor calidad y flexibilizando los productos prefabricados. Al final del siglo XX, las edificaciones en altura con prefabricados inflexibles fueron abandonadas y demolidas, retornando a métodos de construcción tradicionales para edificaciones en altura, mientras los prefabricados se usaron más en construcciones públicas como escuelas y hospitales (de Sutter Arroyo, 2015).

Tabla 4: Clasificación de los prefabricados

Cerrados:

- Sistemas que solo aceptan elementos de su propio sistema y son técnicamente inflexibles.

Parciales:

- Sistemas con productos fijos que pueden variar y utilizarse en proyectos tradicionales.

Mecano:

- Sistemas cerrados evolucionados con una amplia gama de productos que, al unirse, forman un conjunto.

Abiertos:

- Sistemas que aprovechan la intercambiabilidad, conformados por especificaciones universales y utilizables con otros productos

Fuente: Elaboración propia sobre Sutter Arroyo (2015)

La prefabricación de hormigón ha evolucionado hacia sistemas abiertos, más flexibles y versátiles, respondiendo a las demandas del sector gracias a avances en tecnología y materiales (Tabla 4). Los nuevos hormigones son más ligeros y resistentes, y los procesos de producción más automatizados e inteligentes, mejorando la calidad y variedad de los productos. A pesar de que la construcción sigue siendo mayormente artesanal, factores como la falta de mano de obra calificada y los altos niveles de desperdicio de material impulsan una mayor industrialización (de Sutter Arroyo, 2015).

El hormigón prefabricado se aplica en múltiples campos de construcción, ofreciendo ventajas como resistencia al fuego, aislamiento acústico y térmico, y estanqueidad al agua y viento (de Sutter Arroyo, 2015). Estos beneficios se extienden a la reducción de costos y tiempo de construcción, así como a la mejora de la calidad del trabajo, al permitir una producción en masa de unidades en un entorno controlado.

La construcción prefabricada se clasifica en dos categorías: prefabricación en el sitio y fuera del sitio (en fábrica). La prefabricación en el sitio implica hacer los elementos estructurales en el lugar de la obra antes de instalarlos, ofreciendo ventajas como la producción en masa, reducción de costos y tiempo, y mejor calidad. La prefabricación fuera del sitio transfiere la construcción a una fábrica, permitiendo construir componentes en cualquier lugar conveniente, siempre que se entreguen a tiempo. Esto también ayuda a reducir los residuos de construcción, un beneficio significativo resaltado en varios estudios (Nor Azmi, et al., 2012).

En Hong Kong, se descubrió que la prefabricación puede reducir los residuos de construcción en un 52%, lo cual sugiere que su uso más amplio podría disminuir considerablemente la generación de residuos. Otros estudios indican que la prefabricación mejora la productividad, la calidad y requiere menos trabajadores calificados (Nor Azmi, et al., 2012). La adopción de la prefabricación también puede aumentar la conciencia ambiental a través de la educación y la capacitación promovida por el gobierno.

La prefabricación de hormigón ofrece en todo caso, una alternativa eficiente y sostenible para la construcción de viviendas unifamiliares de interés social en la zona centro-sur de Chile. Sus numerosas ventajas, incluyendo la reducción de costos y tiempo, la mejora de la calidad y la sostenibilidad, la hacen una opción atractiva frente a los métodos de construcción convencionales. La evolución de los sistemas prefabricados hacia una mayor flexibilidad y versatilidad refuerza aún más su aplicabilidad y beneficios en el sector de la construcción.

2.2.5. Análisis de costos de la construcción asociados a cada método constructivo

El avance en tecnología, materiales y soluciones constructivas en la industria de los prefabricados ha sido notable en los últimos años. Este progreso se debe principalmente a la creciente demanda de construcción industrializada a nivel mundial. En diversas ferias especializadas, se pueden observar lanzamientos de maquinarias altamente automatizadas, fábricas robotizadas y de impresión 3D, así como nuevas versiones de software para diseño, fabricación y control de producción. Estos desarrollos incluyen innovadores diseños de moldes, máquinas moldeadoras y novedosos instrumentos de medición. Todos estos avances están enfocados en mejorar la productividad, la calidad, la eficiencia y la economía de escala dentro de las plantas industriales, respondiendo así a las necesidades del mercado en menor tiempo y optimizando costos (Martínez, 2021).

El Sistema Constructivo Industrializado de Paneles de Madera ha ganado popularidad en la construcción de viviendas unifamiliares debido a sus múltiples ventajas económicas y ambientales (Tabla 5).

Tabla 5: Beneficios del sistema constructivo industrializado de paneles de madera desde la perspectiva de costos

Reducción de Tiempo de Construcción:

- La fabricación de paneles de madera en un entorno controlado permite una mayor eficiencia y rapidez en el ensamblaje en el sitio de construcción. Esto no solo acorta el tiempo total del proyecto, sino que también reduce los costos asociados con la mano de obra y el alquiler de maquinaria y equipo en el sitio.

Menores Costos de Materiales:

- La madera es un recurso renovable y, en muchos casos, más asequible que otros materiales de construcción. Además, los paneles de madera prefabricados pueden producirse con precisión, lo que minimiza el desperdicio de material y los costos asociados con la eliminación de residuos.

Eficiencia Energética:

- Los paneles de madera ofrecen excelentes propiedades de aislamiento térmico, lo que puede reducir significativamente los costos de calefacción y refrigeración a lo largo del tiempo. Esta eficiencia energética no solo es un beneficio a largo plazo para los propietarios, sino que también puede contribuir a la obtención de subsidios y incentivos gubernamentales para construcciones sostenibles.

Costos de Transporte y Logística:

- Los paneles de madera son relativamente ligeros y fáciles de transportar, lo que puede reducir los costos de logística en comparación con materiales más pesados como el hormigón. La facilidad de manipulación y transporte de los paneles de madera puede resultar en ahorros adicionales durante la fase de construcción.

Fuente: Elaboración propia sobre Martínez (2021)

Sin embargo, es importante considerar que el costo inicial de adquisición e instalación de paneles de madera puede ser más alto que el de métodos convencionales, aunque estos costos se compensan con los ahorros mencionados a largo plazo.

El Método de Prefabricación de Hormigón es por otro lado, ampliamente utilizado en la construcción debido a su durabilidad y resistencia. Según un estudio realizado por Markets and Markets, se proyecta que el tamaño del mercado global de prefabricados de hormigón crecerá de USD 130.6 mil millones en 2020 a USD 174.1 mil millones para 2025. Este crecimiento es impulsado por el aumento de la demanda en la construcción residencial y comercial, el interés de los contratistas en el uso de elementos prefabricados individuales (como columnas, vigas, losas y cerchas) para construir estructuras completas, y el incremento de la inversión pública y privada en el desarrollo de infraestructura global (Martínez, 2021).

En Chile, la oferta de soluciones con prefabricados de hormigón ha aumentado en los últimos años. Aunque ha habido un ligero incremento en la demanda de estos elementos para la construcción de infraestructura, edificios comerciales, residenciales, minería y vivienda, alcanzar los estándares mundiales requerirá un avance significativo tanto a nivel público como privado. Esto permitirá que su uso se masifique y, a través de la industrialización, se consiga una mejora en la productividad. El estudio realizado en 2020 por Matrix Consulting para la Comisión Nacional de Productividad y la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) señalaba que la penetración de prefabricados en edificaciones en altura en Chile es baja en

comparación con países referentes. En estos países, elementos como muros o losas de hormigón son ampliamente utilizados en un 22% a 28% de los casos, mientras que en Chile solo se usan en un 2% de las construcciones. Sin embargo, las obras nacionales que han utilizado prefabricados lograron un aumento en la productividad del 22%, tanto en obra gruesa como en terminaciones (Martínez, 2021) El método presenta en todo caso, una serie de ventajas económicas, pero con diferentes implicaciones en los costos (Tabla 6).

Tabla 6: Beneficios del sistema constructivo industrializado de hormigón desde la perspectiva de costos

Costo Inicial de Producción:
<ul style="list-style-type: none">• La fabricación de elementos prefabricados de hormigón en una fábrica puede ser costosa debido a la necesidad de equipos especializados y personal calificado. Sin embargo, la producción en masa de estos componentes puede reducir los costos unitarios a medida que aumenta la escala del proyecto.
Reducción de Tiempo en Obra:
<ul style="list-style-type: none">• Similar a los paneles de madera, los elementos prefabricados de hormigón permiten una rápida instalación en el sitio, lo que reduce el tiempo total de construcción. Esto se traduce en menores costos de mano de obra y menores riesgos de retrasos asociados con condiciones climáticas adversas u otros factores externos.
Durabilidad y Mantenimiento:
<ul style="list-style-type: none">• El hormigón es conocido por su durabilidad y resistencia a diversas condiciones ambientales. Aunque el costo inicial puede ser elevado, la longevidad de las estructuras de hormigón reduce los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo.
Costos de Transporte:
<ul style="list-style-type: none">• El hormigón prefabricado es pesado y voluminoso, lo que puede incrementar significativamente los costos de transporte. Es esencial planificar adecuadamente la logística para minimizar estos gastos y asegurar una entrega oportuna de los componentes al sitio de construcción.
Flexibilidad y Adaptabilidad:
<ul style="list-style-type: none">• A pesar de las ventajas económicas, el hormigón prefabricado puede ser menos flexible en términos de diseño y modificaciones en comparación con otros métodos. Esto puede resultar en costos adicionales si se requieren cambios significativos durante el proceso de construcción.

Fuente: Elaboración propia sobre Martínez (2021)

En la comparación entre el Sistema Constructivo Industrializado de Paneles de Madera y el Método de Prefabricación de Hormigón, es evidente que cada método presenta ventajas y desventajas económicas específicas. Los paneles de madera ofrecen beneficios en términos de reducción de tiempo de construcción, eficiencia energética y menores costos de transporte, mientras que el hormigón prefabricado destaca por su durabilidad y menor costo de mantenimiento a largo plazo.

La elección entre estos métodos dependerá en todo caso, de varios factores, incluidos el presupuesto del proyecto, los plazos de construcción, las condiciones del sitio y las necesidades específicas de durabilidad y diseño. En el contexto de viviendas unifamiliares de interés social en la zona centro-sur de Chile, ambos métodos pueden ser viables, pero una evaluación detallada de los costos y beneficios específicos de cada proyecto es esencial para tomar una decisión informada.

A nivel global, se espera un mayor crecimiento del mercado y uso de prefabricados. Esta tendencia influirá también a nivel nacional, ya que la industrialización es clave para la reactivación económica. Entre 2020 y 2022, las carteras de Obras Públicas (MOP) y Vivienda (Minvu) en Chile fue la principal inversora para la recuperación del empleo y la actividad industrial, con cerca de USD 3 mil millones por parte del MOP y USD 1,400 millones por parte del Minvu. Para la implementación efectiva de estas soluciones, es necesaria una contraparte innovadora que busque soluciones más eficientes, optimice la mano de obra y maximice los ahorros en construcción. El profesional desde su rol de diseño, construcción, evaluación o supervisión de los modelos desarrollados debe ser en cualquier caso, considerado como un socio estratégico durante todo el desarrollo del proyecto, colaborando estrechamente con todos los profesionales involucrados desde la fase de diseño hasta la construcción, para lograr edificaciones de éxito que beneficien al usuario final por la reducción del tiempo de entrega y la mejora en la calidad del edificio (Martínez, 2021)

2.2.6. Normativas y estándares de la construcción

En Chile, la construcción se regula por el Decreto con Fuerza de Ley N° 458¹ desde 1976, conocido este como la "Ley General de Urbanismo y Construcción". Esta normativa general establece las disposiciones legales relacionadas con la planificación urbana, la urbanización y la construcción. La ley incluye los principios, atribuciones, potestades, facultades, responsabilidades, derechos, sanciones y demás normas que rigen a los organismos, funcionarios, profesionales y particulares involucrados en dichas actividades (Gysling et al., 2021).

La implementación de la Ley General de Urbanismo y Construcción se realiza a través de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC). Este cuerpo legal regula los procedimientos administrativos, el proceso de planificación urbana, la urbanización y la construcción, así como los estándares técnicos de diseño y construcción. La ley exige el cumplimiento de Normas Técnicas, que especifican las características técnicas de los proyectos, materiales y sistemas de construcción y urbanización, para asegurar el cumplimiento de los estándares establecidos en la Ordenanza General (Gysling et al., 2021).

De forma específica, la OGUC² es el principal marco legal que regula a su vez, el uso de la madera en la construcción. Además, existen otras disposiciones normativas, como las relacionadas con los instrumentos de subsidio habitacional, que establecen requisitos específicos para el uso de la madera en las viviendas. Es importante destacar que las

¹ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13560>

² <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201>

construcciones prefabricadas de madera (Clase H) no pueden tener más de dos pisos, y las construcciones con estructura soportante de madera (Clase E) pueden ser aceptadas como piso superior de las clases C o D. Además, estas construcciones deben cumplir con las disposiciones del artículo 5.6.8 de la OGUC, y los elementos de madera en otras clases deben cumplir con los artículos 5.6.6 y 5.6.8 (Gysling et al., 2021).

Según lo establecido en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), se definen nueve clases de construcciones, categorizadas en función de los materiales predominantes utilizados (Tabla 7).

Tabla 7: Clases de construcciones categorizadas en función de los materiales predominantes utilizados

Clase A:	<ul style="list-style-type: none">• Construcciones con estructura soportante de acero, con entrepisos de perfiles de acero o losas de hormigón armado.
Clase B:	<ul style="list-style-type: none">• Construcciones con estructura soportante de hormigón armado o estructura mixta de acero y hormigón armado, con entrepisos de losas de hormigón armado.
Clase C:	<ul style="list-style-type: none">• Construcciones con muros soportantes de albañilería de ladrillo confinado entre pilares y cadenas de hormigón armado, con entrepisos de losas de hormigón armado o entramados de madera.
Clase D:	<ul style="list-style-type: none">• Construcciones con muros soportantes de albañilería de bloques o piedra, confinados entre pilares y cadenas de hormigón armado, con entrepisos de losas de hormigón armado o entramados de madera.

Clase E:

- Construcciones con estructura soportante de madera, con paneles de madera, fibrocemento, yeso-cartón o similares, incluidas las tabiquerías de adobe, y entresijos de madera.

Clase F:

- Construcciones de adobe, tierra cemento u otros materiales livianos aglomerados con cemento, con entresijos de madera.

Clase G:

- Construcciones prefabricadas con estructura metálica, con paneles de madera, prefabricados de hormigón, yeso-cartón o similares.

Clase H:

- Construcciones prefabricadas de madera, con paneles de madera, yeso-cartón, fibrocemento o similares.

Clase I:

- Construcciones de placas o paneles prefabricados, con paneles de hormigón liviano, fibrocemento o paneles de poliestireno entre mallas de acero para recibir mortero proyectado.

Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC)

Aunque los estándares de diseño y cálculo para hormigón están incluidos en la norma chilena NCh 430³, que abarca el hormigón prefabricado, hasta hace poco no había una norma específica centrada en los elementos de hormigón prefabricado propiamente dichos. Recientemente, se estableció un convenio entre el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y el Instituto Nacional de Normalización (INN), donde se propusieron revisar 15 normas, incluidas seis relacionadas con materiales prefabricados. Este conjunto de normas, basado en la normativa UNE de España y comenzado en agosto de 2018, tiene como finalidad complementar las normativas existentes para prefabricados, que son escasas y específicas (Kraljevich, 2024).

El enfoque de estas nuevas normativas es proporcionar una estructura base que podría guiar la creación de futuras regulaciones, marcando un patrón sobre cómo deberían ser las normativas subsiguientes. El conjunto de normas está orientado exclusivamente a productos, y no al diseño, lo que implica que el diseño debe ajustarse específicamente a la norma del producto que se esté diseñando. Por ejemplo, la norma general para productos de hormigón

³ https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh430_OF2008.pdf

prefabricado sigue la NCh 170⁴, que establece el hormigón de grado G17 como mínimo para todos los hormigones estructurales.

En lo que respecta a detalles específicos del diseño de cada producto, como las escaleras, la normativa permite una variación en la altura de los peldaños para acomodar diferencias que puedan surgir de la división de los peldaños. Este ajuste permite cubrir ciertas características que antes requerían explicación detallada al cliente, simplificando el proceso y considerando las distintas etapas del ciclo de vida del producto, desde el desmolde hasta su uso final.

La normativa también especifica que todos los materiales utilizados deben cumplir con las normas chilenas correspondientes para garantizar la conformidad de los prefabricados con los estándares establecidos. En situaciones donde las geometrías sean complejas, puede ser necesario complementar el diseño estructural a través de la prueba de prototipos.

Además, las nuevas normas abordan el transporte, almacenamiento e instalación de los elementos prefabricados, estableciendo directrices claras sobre cómo manejar estas etapas para garantizar la seguridad y eficacia. También se han definido estándares para las conexiones metálicas en términos de durabilidad, resistencia y ductilidad, y se han especificado procedimientos para el cálculo del peso de los prefabricados, un factor crucial para su manejo e instalación.

La reciente norma chilena NCh 3619⁵ ofrece así, un marco regulatorio exhaustivo para la industria de prefabricados de hormigón, asegurando que los productos no solo cumplen con los requisitos estructurales y estéticos, sino que también se gestionan e instalan adecuadamente, proporcionando así un enfoque integral que beneficia tanto a fabricantes como a consumidores.

La Tabla 8 resume a continuación de manera estructurada los principales puntos de la normativa de prefabricados de hormigón en Chile. Cada categoría refleja aspectos clave que han sido regulados para mejorar la estandarización y calidad en la industria de la construcción con prefabricados de hormigón.

Tabla 8: Categorías normadas de prefabricados de hormigón en Chile

Categoría	Descripción
Diseño	Se establece que el diseño de los elementos prefabricados debe ajustarse a la norma específica del producto que se está diseñando. Esto incluye aspectos como la variabilidad en la altura de los peldaños de las escaleras para acomodar diferencias derivadas de la división de los peldaños.
Materiales	Todos los materiales empleados en la fabricación de elementos prefabricados deben cumplir con las normas chilenas aplicables para

⁴ <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh170Of85.pdf>

⁵ <https://ecommerce.inn.cl/nch3619202178847>

	asegurar que los productos estén conformes con los estándares de calidad y seguridad.
Especificaciones Técnicas	La norma general para prefabricados de hormigón establece que el grado mínimo de hormigón debe ser G17, conforme a la NCh 170. Además, se consideran las necesidades de prueba de prototipos para geometrías complejas.
Procedimientos	Se describen detalladamente los procedimientos para el transporte, almacenamiento e instalación de elementos prefabricados. Esto incluye directrices sobre cómo realizar estas etapas de manera segura y eficaz.
Estándares de Conexión	Se han fijado estándares para las conexiones metálicas, asegurando su durabilidad, resistencia y ductilidad.
Cálculo del Peso	Se detalla un procedimiento estándar para el cálculo del peso de los prefabricados, crucial para su manejo e instalación, especialmente cuando se utilizan grúas.
Normas de Montaje e Izaje	Se han establecido tolerancias y métodos de izaje específicos que deben seguirse durante la instalación de los elementos prefabricados.
Características Superficiales	Las características superficiales como oquedades, porosidades, fisuras, y otros defectos menores tienen definiciones y desviaciones permitidas que pueden ser reparadas según especificaciones detalladas en la norma.
Marcado de Productos	La norma exige que cada producto prefabricado incluya información relevante como la identificación del fabricante, fecha de fabricación, y cualquier otra información pertinente. Para elementos menores, se permite un marcado por lote.

Fuente: Elaboración propia sobre Kraljevich (2024)

Las normas y regulaciones en Chile, particularmente aquellas consolidadas en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), han establecido, un marco robusto para fomentar y regular la construcción de viviendas sociales usando materiales prefabricados de hormigón. Según de Sutter Arroyo (2015), este conjunto de directrices es crucial para garantizar que estas viviendas no solo cumplan con altos estándares de sostenibilidad y eficiencia energética, sino que también contribuyan al bienestar de sus habitantes y al desarrollo urbano ordenado y sustentable.

La OGUC, no solo reglamenta la Ley General de Urbanismo y Construcciones sino que también establece regulaciones específicas que impactan directamente en la construcción de estas viviendas. Dentro de su Título 6, dedicado a las viviendas económicas, se destacan normativas como las que limitan la altura de las construcciones a cuatro pisos y dictan condiciones específicas sobre rasantes, distanciamiento, uso de suelo y densidades. Además, la ordenanza facilita la modificación de ciertos estándares en proyectos de gran escala, lo que permite una adaptación más flexible a los requisitos del entorno y del proyecto.

Complementariamente, manuales técnicos como la Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social⁶ y el Manual de inspección técnica de obras⁷ proporcionan lineamientos esenciales para integrar principios de sostenibilidad en el diseño y asegurar la coherencia en la ejecución de estas construcciones, mientras que el Manual de Tasación para el subsidio habitacional⁸ juega un papel fundamental en la valoración de los inmuebles destinados a viviendas sociales, facilitando así la implementación de políticas de subsidio habitacional. Estos instrumentos son fundamentales para orientar la práctica profesional y asegurar que las viviendas construidas no solo sean accesibles, sino que también sean habitables, eficientes y duraderas.

Todas las actividades de construcción ya sean nuevas edificaciones, reconstrucciones, reparaciones, modificaciones, ampliaciones o demoliciones, necesitan obtener un permiso de la Dirección de Obras Municipales, aunque hay ciertas excepciones previstas en la OGUC. Este Permiso de Edificación (PE) tiene una validez de tres años a partir de su emisión, y se considera que los trabajos han comenzado una vez que se efectúan los trazados y excavaciones conforme a los planos aprobados. La emisión del PE requiere el pago de tarifas municipales, que se calculan basándose en el presupuesto de la obra según una tabla de costos unitarios proporcionada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo cada año.

Según la Ley General de Urbanismo y Construcciones, es obligatorio solicitar la autorización de la Dirección de Obras Municipales para cualquier tipo de obra de construcción, con algunas excepciones para infraestructuras de salud, energía, transporte estatal, y ciertas obras menores en viviendas, entre otras. La aprobación del permiso exige la conformidad con la OGUC y los planes reguladores locales, además del correspondiente pago de las tarifas.

La supervisión técnica de las obras varía según el tipo de administración del proyecto. En los proyectos estatales, un Inspector Fiscal supervisa la correcta ejecución, mientras que en el sector privado, esta tarea recae en un Inspector Técnico de Obras (ITO). Este último, según lo define la Ley General de Urbanismo y Construcciones, tiene la responsabilidad de asegurar que las obras se lleven a cabo según los estándares y proyectos técnicos aprobados, teniendo incluso la autoridad para ordenar demoliciones parciales en caso de incumplimientos. Además, la Ley N°20.703⁹ de 2013 organiza los registros de estos inspectores y revisores de proyectos estructurales, definiendo las categorías según la competencia técnica y experiencia, facilitando la selección adecuada para cada proyecto.

La OGUC también especifica que para nuevas construcciones que requieran permiso de edificación es mandatorio presentar un proyecto de cálculo estructural. Esto aplica particularmente a edificios de uso público, complejos habitacionales gestionados por los servicios de vivienda y urbanización, y construcciones destinadas a mantenerse operativas

⁶ <https://catalogo.extension.cchc.cl/documentos/documentos/35943-2.pdf>

⁷

http://valpo.serviu.cl/Doc_Difusion/2011/CentroOIRS/Manual%20Inspeccion%20Tecnico%20de%20Obras.pdf

⁸ https://proveedores tecnicos.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2022/04/CUERPO_N_1.pdf

⁹ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1055816>

en emergencias, como hospitales y estaciones de bomberos. Sin embargo, hay excepciones a esta regla para estructuras menores de 100 m² y edificaciones de baja ocupación, que deben cumplir únicamente con las normativas mínimas para elementos constructivos que no requieran cálculos de estabilidad estructural, como es el caso de algunas estructuras de madera que pueden incluir ciertas alturas y características específicas sin necesitar un cálculo estructural detallado.

Para las construcciones con estructura de madera no sometidas a cálculo estructural (Artículo 5.6.6), se deben utilizar piezas de madera aserrada que cumplan con normas específicas, como la NCh 1989, NCh 1970/1 y NCh 1970/2, entre otras. Además, se han desarrollado nuevas normas, como la NCh 3617 para madera contrachapada estructural y la NCh 3618 para tableros de uso estructural, que fueron revisadas por un comité técnico y apoyadas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y Madera21 de CORMA.

Estas normas técnicas permiten avanzar hacia la construcción industrializada en madera, asegurando la calidad en la construcción y sus productos. Con la aprobación de estas normas, la Autoridad Competente puede exigir la certificación de los productos según estas normativas, impulsando la innovación tecnológica en el sector de la madera.

Tabla 9: Normas Técnicas Oficiales para elementos de construcción en madera no sometidos a cálculo estructural (Artículos 5.6.6 y 5.6.8 de la OGUC)

NORMA	TÍTULO
NCh 789/1	Maderas - Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural
NCh 819	Madera preservada - Pino radiata - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo
NCh 1207	Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad
NCh 1970/1	Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad
NCh 1970/2	Maderas - Parte 2: Especies coníferas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad
NCh 1989	Maderas - Agrupamiento de especies madereras según su resistencia - Procedimiento

Fuente: Gysling et al. (2021)

Adicionalmente, los elementos estructurales de las edificaciones de madera deben cumplir con normas de durabilidad y resistencia a la humedad específicas para la zona climático-habitacional, como se indica en los artículos 5.6.6 y 5.6.8 de la OGUC (Tabla 9). Las normas técnicas oficiales citadas en la OGUC son obligatorias y su aplicación es responsabilidad de los profesionales competentes y del propietario de la obra (Tabla 10).

Tabla 10: Normas Técnicas Oficiales para realizar los cálculos estructurales

NORMA	TÍTULO
--------------	---------------

NCh 1198	Madera - Construcciones en madera - Cálculo
NCh 1990	Madera - Tensiones admisibles para madera estructural
NCh 2151	Madera laminada encolada estructural - Vocabulario
NCh 2165	Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata

Fuente: Gysling et al. (2021)

Por último, la OGUC regula aspectos como la resistencia al fuego y el etiquetado de la madera aserrada, estableciendo requisitos de rotulado para la transparencia en la calidad del producto. Este marco normativo es esencial para fomentar el uso de la madera en la construcción, garantizando estándares de calidad y seguridad en las edificaciones (Tabla 11).

Tabla 11: Normas Técnicas Oficiales establecidas en el DS10 relacionadas con madera

NORMA	TÍTULO
NCh 176/1 2003	Madera - Parte 1: Determinación de humedad
NCh 631 2003	Madera preservada - Extracción de muestras
NCh 723	Hojas de puertas lisas de madera - Métodos de ensayo
NCh 755	Madera - Preservación - Medición de la penetración de preservantes en la madera
NCh 763/1 1996	Maderas - Preservación - Parte 1: Análisis de madera preservada y soluciones preservantes mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X
NCh 763/2 1996	Maderas - Preservación - Parte 2: Análisis de madera preservada y soluciones preservantes mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X
NCh 819	Madera preservada - Pino radiata - Clasificación según uso y riesgo en servicio y muestreo
NCh 2148 2013	Madera laminada encolada estructural - Requisitos, métodos de muestreo e inspección
NCh 2150 1989 Mod.1991	Madera laminada encolada - Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata

Fuente: Gysling et al. (2021)

Estas normas técnicas establecen los requisitos y métodos necesarios para asegurar la calidad y seguridad de las construcciones en madera en Chile, cumpliendo con los estándares establecidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

En Chile, menos del 20% de las viviendas se construyen con estructura de madera. Sin embargo, este porcentaje se eleva al 34% cuando se considera solo la construcción de casas, posicionando a la madera como el principal material de construcción en este tipo de edificaciones. En contraste, los departamentos no utilizan la madera a nivel estructural. En comparación, países como Estados Unidos y Canadá emplean la madera en cerca del 90% de sus viviendas, tanto casas como departamentos. Esta diferencia destaca el potencial para incrementar el uso de la madera en la construcción chilena, considerando que Chile es un gran productor de madera, con más de 8 millones de metros cúbicos de madera aserrada y más de 3 millones de metros cúbicos de tableros de madera producidos anualmente. Varias políticas nacionales buscan incentivar este proceso (Tabla 12)

Tabla 12: Políticas nacionales que incentivan el uso de la madera en la construcción

Política Forestal 2015-2035

- Reconociendo la importancia de aumentar el uso de la madera en la construcción, la Política Forestal 2015-2035 para Chile establece como objetivo convertir a la madera en uno de los principales componentes de los materiales de construcción en el país. Esta política busca incrementar significativamente su utilización en vivienda, industria e infraestructura pública, basándose en un producto estandarizado y certificado por la industria maderera.

Política Energética

- La Política Energética de Chile establece como meta para el año 2050 que el 100% de las edificaciones de uso público y residencial nuevas cuenten con estándares OCDE de construcción eficiente. Para lograrlo, la política propone edificar de manera eficiente incorporando estándares de eficiencia energética en el diseño, construcción y reacondicionamiento de edificaciones, minimizando así los requerimientos energéticos y las externalidades ambientales, y alcanzando niveles adecuados de confort.

Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA)

- Los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), parte de la Estrategia de Descontaminación Atmosférica 2014-2018 del Ministerio del Medio Ambiente, se enfocan en mejorar el estándar térmico de las viviendas y promover una calefacción eficiente y sostenible, especialmente en el sur de Chile donde la principal fuente de contaminación es el uso de leña para calefacción. Estos planes establecen mayores exigencias para el acondicionamiento térmico de las edificaciones, buscando reducir la demanda de energía para calefacción.

Programa Estratégico Meso Regional de Madera de Alto Valor

- En 2016, CORFO estableció el Programa Estratégico Meso Regional para la Industria de Madera de Alto Valor, con el objetivo de aumentar en un 30% las exportaciones de pequeñas y medianas empresas madereras para 2025 y aumentar en un 30% la superficie construida con sistemas intensivos en madera respecto a la superficie total construida a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia

Uno de los pilares de la política habitacional de Chile es el subsidio habitacional, que facilita el acceso a la vivienda para la población. Existen varios programas de subsidio enfocados en la construcción y adquisición de viviendas, así como en el mejoramiento de las viviendas existentes. Estos programas no especifican el uso de determinados materiales de construcción, sino que se adhieren a los estándares técnicos mínimos establecidos en las normativas correspondientes (Tabla). Algunos de los principales subsidios incluyen:

Tabla 13: Principales subsidios según estándares términos

Fondo Solidario de Elección de Vivienda (D.S. N° 49):

- Permite la compra o construcción de viviendas sin crédito hipotecario en sectores urbanos o rurales.

Sistema Integrado de Subsidio Habitacional (D.S. N° 1):

- Destinado a familias de sectores medios para la construcción de viviendas en sitio propio o en densificación predial.

Programa de Habitabilidad Rural (D.S. N° 10):

- Mejora las condiciones de habitabilidad en zonas rurales y localidades pequeñas, ofreciendo alternativas de construcción en sitio residente o en conjunto habitacional.

Fuente: Elaboración propia

Desde 2016, se lanzó el Concurso Regional del Programa de Integración Social y Territorial (D.S. N° 19)¹⁰ para la construcción de un proyecto icónico de edificio en madera de alto estándar y mediana altura en la región de O'Higgins. Este proyecto destaca la importancia de la madera como material de construcción y podría servir como base para futuras normativas que regulen este tipo de edificaciones.

Las normas ISO¹¹ (International Organization for Standardization) son por otro lado, un conjunto de estándares internacionales que aseguran la calidad, seguridad y eficiencia de productos y servicios. La incorporación de normas ISO en el uso de la madera en proyectos de construcción en Chile puede fortalecer la competitividad de la industria maderera, asegurar el cumplimiento de estándares internacionales y mejorar la sostenibilidad y eficiencia de las edificaciones (Tabla 14).

Tabla 14: Normas ISO relevantes para la construcción en madera en Chile

¹⁰ <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1092547>

¹¹ <https://www.iso.org/es/home>

ISO 21887:2007 - Durability of wood and wood-based products:

- Esta norma establece los requisitos y métodos para evaluar la durabilidad de la madera y los productos derivados de la madera. Asegurar la durabilidad es crucial para la longevidad y la seguridad de las estructuras de madera.

ISO 12466-1:2007 - Plywood - Bonding quality:

- Esta norma especifica los requisitos de calidad de adhesión para la madera contrachapada. La calidad de adhesión es fundamental para la resistencia y estabilidad estructural de los paneles de madera utilizados en la construcción.

ISO 8375:2016 - Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and bending strength:

- Esta norma detalla los métodos para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión de los paneles a base de madera. Estos parámetros son esenciales para el diseño estructural y la evaluación del rendimiento de los paneles de madera.

ISO 3349:1975 - Wood - Determination of Modulus of Elasticity in Static Bending:

- Establece los métodos para determinar el módulo de elasticidad en la flexión estática de la madera. Esta medida es crucial para evaluar la capacidad de la madera para soportar cargas sin deformarse permanentemente.

Fuente: Elaboración propia

Integrar normas ISO en la normativa chilena puede ofrecer a su vez, varios beneficios (Tabla 15).

Tabla 15: Beneficios del cumplimiento de Normas ISO

Mejora en la Calidad y Seguridad:

- Adoptar estándares internacionales como las normas ISO puede elevar la calidad y seguridad de las construcciones de madera en Chile, asegurando que los materiales y métodos de construcción cumplan con los requisitos más estrictos.

Facilitación del Comercio Internacional:

- La alineación con normas ISO facilita el comercio internacional de productos de madera, ya que estos estándares son reconocidos globalmente. Esto puede abrir nuevos mercados para los productores chilenos de madera.

Sostenibilidad y Eficiencia Energética:

- Las normas ISO también abarcan aspectos de sostenibilidad y eficiencia energética. Por ejemplo, las normas relacionadas con la durabilidad y el desempeño de los materiales contribuyen a la construcción de edificios más eficientes y sostenibles.

Competitividad de la Industria Maderera:

- La adopción de normas ISO puede mejorar la competitividad de la industria maderera chilena, permitiendo a los productos de madera cumplir con los estándares internacionales y ser más atractivos en el mercado global.

Fuente: Elaboración propia sobre Schueftan et al. (2021)

La inclusión de normas ISO en la normativa y práctica de la construcción con madera en Chile puede significar un avance significativo en la calidad, seguridad y sostenibilidad de las edificaciones. Al adoptar estos estándares internacionales, Chile no solo mejora sus prácticas constructivas, sino que también posiciona su industria maderera de manera competitiva en el mercado global, contribuyendo al desarrollo sostenible y la eficiencia energética en los proyectos de interés social.

Schueftan et al. (2021), detallan varios estándares de sostenibilidad y sistemas de certificación que promueven el uso de la madera en la construcción debido a sus beneficios en términos de eficiencia energética y reducción de impacto ambiental (Tabla 16).

Tabla 16: Sistemas de certificación más relevantes que hoy favorecen el uso de madera

Certificación LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design):

- Es un sistema de certificación desarrollado en Estados Unidos que evalúa el uso eficiente de energía, agua, y materiales, entre otros.
- La madera puede contribuir en varias categorías de LEED®, como "Materiales y Recursos", por su capacidad de ser un material sostenible y reciclable, y en "Calidad Ambiental Interior", por sus propiedades de aislamiento térmico y acústico.

Estándar Passivhaus:

- Es un estándar de eficiencia energética que se centra en minimizar la demanda energética de las viviendas, principalmente a través de una envolvente muy bien aislada y hermética.
- La madera es beneficiosa en este estándar debido a su capacidad para formar parte de sistemas constructivos que ofrecen alto aislamiento térmico y sellado eficiente, características clave para alcanzar la hermeticidad requerida por Passivhaus.

Certificación Edificio Sustentable (CES):

- Es un sistema de certificación chileno que incentiva el diseño y construcción de edificios bajo criterios de sustentabilidad.
- La madera puede mejorar la "Calidad del ambiente interior" y la eficiencia energética, lo cual es crucial en CES. Además, la madera, siendo un recurso local, puede ayudar a cumplir con criterios de utilización de materiales locales y sostenibles.

Calificación Energética de Vivienda (CEV):

- Es un sistema que califica la eficiencia energética de las viviendas en Chile, similar a la etiqueta energética de los electrodomésticos.
- Las viviendas construidas con madera pueden lograr mejores calificaciones en este sistema debido a las propiedades aislantes naturales de la madera, lo que reduce la necesidad de energía para calefacción y refrigeración.

Fuente: Elaboración propia sobre Schueftan et al. (2021)

Estos sistemas de certificación no solo valoran la eficiencia energética y la sostenibilidad, sino que también ofrecen un marco para evaluar cómo los materiales de construcción, como la madera, contribuyen a construcciones más sostenibles y eficientes. La promoción de la madera en estos estándares ayuda a alinear los objetivos de construcción con las metas ambientales y de sostenibilidad, haciendo de la madera una opción cada vez más preferida en proyectos de construcción sustentable.

2.2.7. Estudio de casos y aplicaciones prácticas en Chile

En Chile, la coordinación y formulación de políticas relacionadas con la vivienda social se centralizan en el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), mientras que las labores de ejecución, evaluación, fiscalización y aprobación de proyectos habitacionales son

responsabilidad del Servicio de Vivienda y Urbanización (SERVIU) a nivel regional, entidad que depende del MINVU. La estrategia habitacional del país se basa primordialmente en otorgar subsidios que faciliten la compra de viviendas desarrolladas por entidades privadas. Dichos subsidios están diseñados para atender a diversos segmentos poblacionales, incluyendo programas específicos para los grupos más vulnerables, los cuales no solo cubren el costo total de la vivienda sino que también fomentan la participación comunitaria y ofrecen apoyo social durante todo el proceso de desarrollo (Peralta, 2022).

En años recientes, el avance en la infraestructura pública chilena ha mejorado la calidad de vida de los ciudadanos, subrayando la necesidad de abordar de manera sistemática el impacto ambiental de las construcciones y su influencia en los ámbitos económico, social y cultural del país. Así, ha emergido la necesidad de integrar principios de sostenibilidad, eficiencia energética, uso de recursos renovables, manejo de agua, construcción sostenible y gestión de residuos en el diseño, construcción y operación de proyectos, incluyendo los contratos de concesión (Falconer Pettit, Montenegro Parra, & Cancino Quijada, 2021).

Este enfoque resulta esencial para enfrentar los desafíos ambientales actuales, en particular en el contexto del cambio climático y los compromisos internacionales asumidos por Chile para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, el Ministerio de Obras Públicas de Chile, a través del "Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022", se ha comprometido a implementar y administrar prácticas y parámetros ambientales en los proyectos de infraestructura. El objetivo es mejorar los índices de sostenibilidad de las inversiones y reforzar las medidas de adaptación al cambio climático, alineándose con los compromisos del Acuerdo de París y la Agenda 2030 para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Falconer Pettit, Montenegro Parra, & Cancino Quijada, 2021).

Adicionalmente, se han establecido programas de Integración Social y Territorial cuyo propósito es desarrollar proyectos habitacionales tanto para familias vulnerables como para sectores medios. En estos programas, se espera que los beneficiarios de ingresos medios contribuyan al financiamiento de sus viviendas a través de ahorros personales y créditos hipotecarios. El sistema también contempla programas orientados a la mejora y ampliación de viviendas existentes, promoviendo políticas de densificación y regeneración urbana, así como la concesión de subsidios para el arriendo. Estas políticas multifacéticas reflejan un enfoque integral en la política de vivienda, buscando atender las variadas necesidades habitacionales de la población chilena (Peralta, 2022).

En las décadas de 1980 y 1990, se vivió un auge en la construcción de viviendas sociales en Chile, período durante el cual se construyó el mayor número de estas edificaciones en el siglo XX. Sin embargo, estas construcciones, comúnmente conocidas como "blocks", se caracterizaron por tener dimensiones reducidas (aproximadamente 40 m²) y condiciones constructivas básicas, lo que llevó a problemas significativos de hacinamiento y limitó la capacidad de acceso a viviendas adecuadas para las familias contemporáneas, particularmente debido a las restricciones para acceder a nuevos subsidios por parte de los propietarios actuales (Peralta, 2022).

En respuesta a esta problemática, el año 2016 vio la instauración del Programa de Mejoramiento de Viviendas y Barrios, que incluyó la opción de "Ampliación de Vivienda en

Copropiedad” y también dio lugar al Programa de Regeneración de Conjuntos Habitacionales de Viviendas Sociales (PRCH). Estos programas tienen como fin crear alternativas habitacionales viables mediante la reutilización y puesta en valor de las viviendas ya existentes en manos de los beneficiarios. En los últimos años, han emergido diversas iniciativas en el contexto de los subsidios mencionados, destacándose proyectos como “Brisas del Mar” en Viña del Mar. Antes de la implementación de los subsidios D.S. N°27 y N°18, en el año 2012, el MINVU puso en marcha el programa Segunda Oportunidad, precursor del PRCH. Este programa colaboró estrechamente con las comunidades para realizar diagnósticos y proponer mejoras y ampliaciones de los conjuntos habitacionales existentes. Como resultado, se decidió incrementar la superficie de las viviendas de 40 m² a 57 m², añadiendo un volumen anexo de 2,5 metros de ancho, lo que además contribuyó a mejorar la eficiencia energética mediante la optimización de la envolvente térmica (Peralta, 2022).

La integración de los principios de la economía circular en el sector de la vivienda implica una revisión profunda del proceso de diseño para facilitar la incorporación de materiales innovadores y técnicas constructivas que promuevan la reutilización o el reciclaje de productos y recursos al término de su ciclo de vida. En este contexto, las iniciativas emergentes en América Latina se caracterizan por su diversidad en cuanto a objetivos, nivel de impacto, aplicabilidad y capacidad de expansión en el ámbito de la construcción de viviendas urbanas. Se percibe una clara necesidad de clasificar estos proyectos en función de su potencial influencia en los promotores de viviendas, destacando que esta categorización no necesariamente refleja la capacidad de escalabilidad, replicabilidad y éxito de las distintas propuestas:

- En primer lugar, encontramos la innovación material, que se centra en el desarrollo y aplicación de nuevos materiales creados a partir de elementos reciclados, revalorizados o alternativas bajas en carbono, adaptable a diversas situaciones.
- En segundo lugar, está el sistema constructivo no convencional, que integra materiales o métodos de construcción atípicos, potencialmente empleables como estructura principal de una vivienda, y aplicable en uno o varios contextos.
- Finalmente, se reconoce el reciclaje urbano, que consiste en la reutilización de recursos urbanos, incluyendo infraestructuras y terrenos urbanos, para fomentar proyectos de vivienda enfocados en la densificación y regeneración urbana (Peralta, 2022).

El Sistema Nacional de Inversiones (SNI) de Chile regula el proceso de inversión pública en el país, proporcionando las metodologías, normativas y procedimientos que guían la formulación y evaluación de proyectos de inversión que aspiran a recibir financiamiento estatal. Siendo el más longevo de América Latina y el Caribe, el SNI busca asegurar una distribución de fondos públicos que sea tanto eficaz como eficiente (Alvarado Duffau, 2018).

El Ministerio de Desarrollo Social ha adoptado una postura proactiva en la gestión ambiental al aplicar el Precio Social del Carbono, establecido en US\$ 32,5 por tonelada. Este valor se utiliza en la evaluación técnico-económica de proyectos de construcción pública, permitiendo calcular los ahorros o costos asociados con las emisiones de gases de efecto invernadero. En 2018, se informó al Ministerio de Medio Ambiente sobre la integración del

análisis y valoración de los beneficios por eficiencia energética en la evaluación social de la edificación pública, materializando este enfoque en la evaluación de proyectos de infraestructura pública a través de la herramienta ECSE (Eficiencia y Costos Sociales en Edificios), que incorpora el precio social del carbono (Alvarado Duffau, 2018).

En 2015, como parte de la Política Nacional de Gestión del Riesgo, el Ministerio de Desarrollo Social fue instado a integrar la Reducción de Riesgo de Desastres en la evaluación social de proyectos. En respuesta, se desarrolló una metodología complementaria para evaluar los riesgos de desastres asociados con la ubicación de soluciones potenciales, incluyendo amenazas como incendios forestales, erupciones volcánicas, tsunamis y deslizamientos de tierra. Considerando la vulnerabilidad de la infraestructura chilena a numerosas amenazas naturales y las significativas pérdidas anuales por desastres naturales, se reconoce el desafío de incorporar un enfoque de equidad territorial en la toma de decisiones (Alvarado Duffau, 2018).

Actualmente, se está trabajando en la metodología de planes estratégicos territoriales para estructurar y priorizar proyectos de inversión, aplicándose en programas como Recuperación de Barrios - Quiero Mi Barrio (MINVU) y en carteras de inversión relacionadas con la Capacidad de Carga de Rapa Nui (SUBDERE). En este contexto, la consolidación del Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) es crucial para una asignación eficiente de recursos (Alvarado Duffau, 2018).

Los retos principales del Sistema Nacional de Inversiones (SNI) de Chile en materia de sustentabilidad incluyen integrar el cambio climático como un factor en las inversiones públicas, promover tecnologías y el diseño de infraestructuras resistentes, incorporar la equidad territorial en las decisiones de inversión y actualizar las normativas y metodologías para sostener la sustentabilidad en los proyectos de inversión pública (Alvarado Duffau, 2018).

Históricamente, la construcción de viviendas sociales en Chile ha seguido un modelo de bajo costo y lineal, diseñado para cumplir con demandas específicas del mercado sin tomar en cuenta el impacto ambiental de los materiales usados o la funcionalidad de las viviendas. Aunque el modelo de financiación implementado desde los años ochenta ha sido efectivo para reducir el déficit habitacional y ha servido como referencia en otros países de la región, no ha contrarrestado el aumento en los precios del suelo en las principales ciudades. Este incremento ha sido notorio especialmente en áreas de Santiago, donde la proliferación de viviendas sociales es vista como inadecuada desde una perspectiva arquitectónica y urbanística. Este enfoque ha limitado la innovación tecnológica en el sector y ha favorecido la relación entre el estado y las constructoras sobre la inclusión y participación comunitaria en el desarrollo habitacional (Peralta, 2022).

En cuanto a materiales de construcción, el hormigón armado es predominantemente utilizado en el centro y norte de Chile, mientras que la madera es más común en el sur, particularmente en edificaciones de hasta cuatro pisos. El uso del hormigón armado, compuesto por agua, cemento y áridos, lleva asociados varios impactos ambientales significativos, incluyendo el consumo intensivo de agua y las consecuencias ambientales de la extracción de áridos. También es importante considerar los residuos generados por los encofrados de madera, que

gradualmente están siendo reemplazados por encofrados de aluminio reutilizables, y los diversos aditivos incorporados a la mezcla de hormigón (Peralta, 2022).

Los acabados en las construcciones frecuentemente utilizan aislantes a base de productos químicos y derivados del petróleo, así como pinturas y adhesivos de propiedades similares. Además, es relevante destacar que muchos de los elementos como sanitarios, accesorios de cocina, grifería, ferretería e iluminación son importados de China, lo que implica emisiones adicionales de CO₂ asociadas al transporte marítimo de estos productos (Peralta, 2022).

Respecto a la infraestructura de vivienda social en Chile, tradicionalmente estas no han sido reconocidas por sus cualidades técnicas, como lo evidencian los daños considerables que sufrieron las viviendas Copeva durante el invierno de 1997. Además, muchas viviendas construidas en las últimas décadas no cuentan con aislación térmica adecuada, resultando en un alto consumo energético para la climatización. Recientemente, sin embargo, se ha fortalecido la normativa técnica, exigiendo a las constructoras mejorar tanto sus métodos de construcción como la calidad general de las edificaciones y aumentar la superficie habitable. Actualmente, los estándares de construcción en cuanto a resistencia térmica, sísmica, acústica y protección contra incendios son consistentes para todos los tipos de vivienda, variando solo en aspectos como altura, número de pisos y densidad. Este marco demanda un cumplimiento técnico estricto por parte de los desarrolladores, especialmente en programas como el FSEV, que detalla exhaustivamente las especificaciones técnicas para su implementación. Sin embargo, es infrecuente que los desarrolladores adopten estándares técnicos que superen los requisitos mínimos, situación que se refleja en el sistema de Certificación de Vivienda Sustentable (CVS) del MINVU, donde, de unos 100 proyectos en proceso de certificación, solo cuatro son viviendas sociales (Peralta, 2022).

En el ámbito constructivo, es posible integrar hasta un 2.9% de materiales circulares en un proyecto sin incurrir en costos adicionales, gracias a la disponibilidad de alternativas que reutilizan materias primas en el mercado. Los principales materiales involucrados son el acero, el cemento y las placas de yeso-cartón. Sin embargo, en Chile, la oferta de materiales que promueven la circularidad es todavía limitada. En el escenario óptimo, utilizando la mayor cantidad posible de insumos circulares, se puede lograr una circularidad del 5.6% en la construcción, lo que implica un aumento del 35.79% en los costos de construcción (Peralta, 2022). Los componentes que más contribuyen a aumentar la circularidad con el menor impacto en los costos son el acero, el cemento, las placas de yeso-cartón, las pinturas, las cerraduras, los aislantes térmicos y los revestimientos de fibrocemento. De estos, los revestimientos de fibrocemento son los que más incrementan los costos de construcción. Si los áridos reciclados se integraran en la normativa técnica y se desarrollara un mercado adecuado para ellos, la circularidad en la construcción podría aumentar hasta un 58.04%, representando un incremento adicional del 22.25% sobre el máximo actual de circularidad (Peralta, 2022).

La adopción de prácticas de economía circular en la construcción enfrenta desafíos importantes, comenzando por el alto costo asociado al uso de materiales circulares. En Chile, la diversidad y disponibilidad de estos materiales es reducida, representando menos del 10% de los materiales de construcción y pudiendo aumentar los costos hasta en un 85%. Además, barreras regulatorias y la falta de incentivos económicos complican la adopción de estas prácticas. Para las empresas constructoras, es más económico enviar los Residuos de

Construcción y Demolición (RCD) a vertederos que reciclarlos o reutilizarlos, lo cual limita la innovación en materiales y técnicas de construcción. A esto se añade una resistencia cultural al uso de materiales reciclados o "secundarios" tanto por parte de los desarrolladores como de los consumidores. Sin embargo, la certificación de materiales y la implementación de estándares técnicos pueden fomentar su uso, aunque es fundamental que las normativas permitan y faciliten la incorporación de materiales circulares (Peralta, 2022).

Las políticas de obra pública en Chile se orientan entonces hacia varios ejes estratégicos clave:

- Primero, se enfoca en proteger el patrimonio ambiental y asegurar un uso sostenible de los recursos naturales en el desarrollo de infraestructura pública, minimizando así los impactos ambientales en el territorio y las comunidades.
- Segundo, se da prioridad a la gestión, protección y conservación sostenible del recurso hídrico a nivel nacional y regional.
- Tercero, se destaca la importancia de integrar tempranamente variables ambientales, territoriales y de participación ciudadana e indígena en estudios, políticas, planes, programas, proyectos y obras.

Además, se promueve la participación de las comunidades en la gestión de proyectos de infraestructura pública y se alienta a las empresas consultoras, contratistas y sociedades concesionarias a adoptar prácticas de sustentabilidad ambiental. También se busca minimizar los riesgos asociados a eventos naturales y humanos en un contexto de cambio climático. Finalmente, se fomenta la incorporación de criterios de innovación en las iniciativas ministeriales (MOP, 2018).

La construcción sostenible implica entonces, un enfoque integral de la provisión y administración de infraestructuras y edificaciones públicas, centrado en la sostenibilidad durante todas las fases del ciclo de vida de los proyectos. Este enfoque abarca desde la concepción inicial, la planificación y el diseño, hasta la construcción, operación, y eventual abandono o desmantelamiento de la infraestructura. El objetivo principal es maximizar los beneficios sociales, económicos y ambientales tanto actuales como futuros, mientras se busca minimizar las externalidades negativas que estos proyectos puedan tener sobre el medio ambiente y la calidad de vida de las personas (MOP, 2018).

En el sector de la construcción sostenible, los retos abarcan una mejora completa de los procesos de construcción, desde fomentar una administración de residuos más efectiva y racional hasta integrar innovaciones que aumenten la sostenibilidad de los proyectos y tratar la problemática de la extracción de áridos con medidas de reducción y regulación efectivas. Además, se subraya la importancia de desarrollar sistemas de economía circular para maximizar la eficiencia en el uso de recursos y mejorar los procedimientos de contratación y supervisión. A la par, se enfatiza en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la mejora de la eficiencia operacional de las infraestructuras. Este enfoque implica la integración del plan de acción contra el cambio climático con la gestión de riesgos de desastres para abordar proactivamente los desafíos ambientales y climáticos (MOP, 2018).

Dentro de los Sistemas Constructivos no Convencionales, la madera se presenta como una opción atractiva y viable, particularmente en el sur de Chile, debido a la robusta industria forestal del país. Su uso podría impulsar los mercados locales y disminuir la dependencia de materiales importados, aunque se necesitan incentivos específicos para los desarrolladores privados para promover su adopción. Por otro lado, el Reciclaje Urbano ofrece una solución potencial para resolver el déficit de viviendas sociales bien situadas, mediante la reutilización de infraestructuras existentes y contribuyendo tanto a la neutralidad de carbono como a una gestión de recursos y residuos más eficiente. Sin embargo, para generalizar estas prácticas, es crucial refinar y especificar los programas habitacionales enfocados en la regeneración urbana, dado que actualmente no se ajustan completamente a las necesidades específicas de algunos proyectos y suelen requerir plazos de implementación extensos (Peralta, 2022).

La Política Nacional de Desarrollo Urbano (PN DU) de Chile subraya la importancia de las ciudades como grandes consumidoras de recursos y generadoras de emisiones, resaltando la necesidad de fomentar un desarrollo urbano y constructivo sostenible. Esto implica diseñar y planificar las ciudades en consonancia con el entorno, gestionar de manera eficiente la energía, los recursos naturales y los residuos, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este marco, el MOP ha renovado su Política de Sustentabilidad Ambiental y ha desarrollado el Plan de Acción de los Servicios de Infraestructura frente al Cambio Climático, orientado a la construcción de bajo carbono. Por su parte, el MINVU ha implementado guías para la construcción sostenible y manuales para elementos urbanos sostenibles, promoviendo prácticas y diseños que optimizan el uso de recursos y son ecológicamente responsables (Gobierno de Chile, 2017).

Para alcanzar estos objetivos, se han propuesto medidas específicas en el ámbito de la infraestructura pública y el urbanismo, incluyendo la integración de energías renovables, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en maquinaria y procesos constructivos, la medición de la huella de carbono y la implementación de plataformas para la contabilización de la reducción de dichas emisiones, así como acciones para disminuir las emisiones asociadas al urbanismo y la vivienda (Gobierno de Chile, 2017).

A continuación se mencionarán algunos proyectos emblemáticos de años recientes.

1. Colaboración entre Techo Chile y Tetra Pak en Valparaíso

El proyecto en el Campamento Felipe Camiroaga en Valparaíso es un ejemplo emblemático de innovación en la construcción de vivienda social mediante el uso de materiales reciclados. Esta colaboración entre Techo Chile y Tetra Pak ha revolucionado el concepto de materiales de construcción sostenibles al utilizar aproximadamente 1500 envases de cartón por vivienda, transformados bajo condiciones de alta temperatura y presión para producir placas con excelentes propiedades de resistencia térmica y acústica. Este enfoque no solo optimiza el reciclaje de materiales, sino que también abre nuevas vías para la construcción sostenible en áreas vulnerables. Actualmente, Techo Chile evalúa cómo escalar esta técnica para una aplicación más extensiva, lo que podría marcar un avance significativo en la provisión de soluciones habitacionales sostenibles y económicas en la región (Peralta, 2022).

Figura 1: Colaboración entre Techo Chile y Tetra Pak



Fuente: <https://estacionindustria.com/techo-chile-y-tetra-pak-se-alian-para-incorporar-material-reciclado-en-la-construccion-e-impulsar-economia-circular/4728/>

2. Edificio de hormigón armado de Consolida

Este edificio de tres pisos, diseñado por la constructora Consolida, se ubica dentro de un marco de microdensificación y pequeños condominios. El proyecto, liderado por Gabriel Lagos, Patricio Bravo y Javiera Paúl, se enfoca en optimizar el espacio y mejorar la calidad de vida de los residentes sin sacrificar la sostenibilidad. La utilización de hormigón armado, seleccionado por su durabilidad y resistencia sísmica, demuestra un compromiso con la construcción robusta y perdurable, aunque también plantea retos en términos de sostenibilidad ambiental que deben ser mitigados mediante tecnologías y prácticas de construcción avanzadas.

Figura 2: Edificios de tres pisos, diseñados por la constructora Consolida



Fuente: <https://hormigonaldia.ich.cl/obra-destacada/condominios-familiares-en-penalolen-un-nuevo-concepto-para-la-vivienda-social/>

3. Edificio de madera para familias vulnerables

Desarrollado con la colaboración de Allan Cid, ex Subdirector de Investigación del Centro de Innovación UC de la Madera y candidato a PhD en Laval University, este edificio de cuatro pisos emplea madera como su principal material constructivo, cumpliendo con las normativas del D.S. N°19. Este proyecto destaca por su integración de materiales locales y sostenibles, reduciendo la huella de carbono y apoyando la industria forestal chilena. La madera, además de ser un material renovable, ofrece beneficios significativos en términos de aislamiento térmico y eficiencia energética.

La experiencia en rehabilitación de viviendas colectivas en altura en el ámbito nacional ha sido limitada y generalmente se ha realizado sin contar con un marco metodológico que guíe estas actividades. No fue hasta el año 2015, con la instauración del Programa de Regeneración de Conjuntos Habitacionales, que se empezó a formalizar la intención de definir criterios metodológicos estandarizados para este tipo de proyectos. Esta iniciativa se consolidó en 2017 con la promulgación del decreto DS18 (MINVU 2017), que propone un modelo de gestión estructurado en tres fases principales: a) diagnóstico, b) desarrollo de un plan maestro, y c) ejecución y conclusión del proyecto. Cada una de estas etapas se desglosa en una serie de actividades, logros y productos que abordan diversas áreas necesarias para el desarrollo de las intervenciones, incluyendo aspectos legales, estructurales y constructivos, organización comunitaria, eficiencia energética, diseño arquitectónico, y la planificación de instalaciones y espacios públicos y equipamientos.

Figura 3: Edificios de cuatro pisos que emplean madera como su principal material constructivo

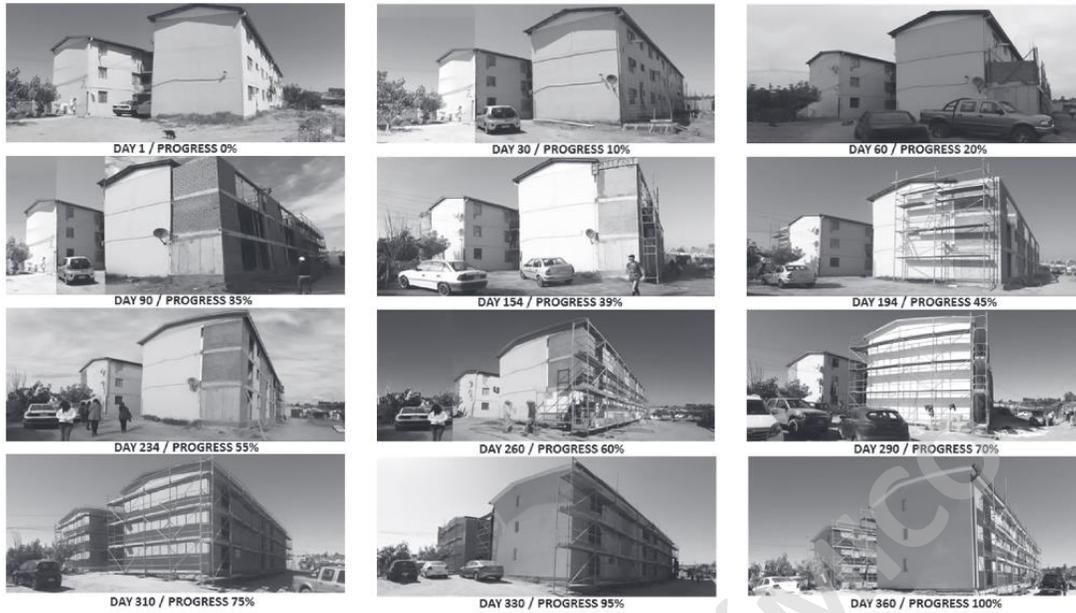


Fuente: <https://maderayconstruccion.com.ar/edificios-de-madera-en-chile-se-presento-ambicioso-plan-de-viviendas-sociales/>

4. Rehabilitación y ampliación de edificios existentes por PLUS Chile

El trabajo de Francisco Chateau y el equipo de Plus Chile en la regeneración de conjuntos habitacionales representa un esfuerzo significativo por mejorar y expandir viviendas existentes. Este proyecto se centra en la reutilización y adaptación de estructuras en albañilería, aplicando principios de diseño sostenible y gestión eficiente de recursos. El enfoque de regeneración no solo mejora las condiciones de vida de los residentes, sino que también preserva el tejido urbano y cultural, demostrando que la sostenibilidad también puede alcanzarse a través de la renovación y no solo mediante la nueva construcción.

Figura 4: Rehabilitación y ampliación de edificios existentes por PLUS Chile



Fuente:

https://www.researchgate.net/publication/372084946_3_Puntos_sobre_la_rehabilitacion_y_ampliacion_de_la_vivienda_colectiva_en_altura_en_CHILE/link/64a41785b9ed6874a5f62c65/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19

Estos casos reflejan la diversidad y complejidad de abordar la sostenibilidad en la construcción de viviendas sociales en Chile. Cada proyecto aporta lecciones valiosas sobre cómo los principios de diseño sostenible y el uso de materiales innovadores pueden integrarse en soluciones habitacionales que son tanto accesibles como respetuosas con el medio ambiente. La expansión de estas prácticas no solo es crucial para el desarrollo urbano sostenible en Chile, sino también para la adaptación a los desafíos globales del cambio climático y la escasez de recursos.

Metodología del trabajo

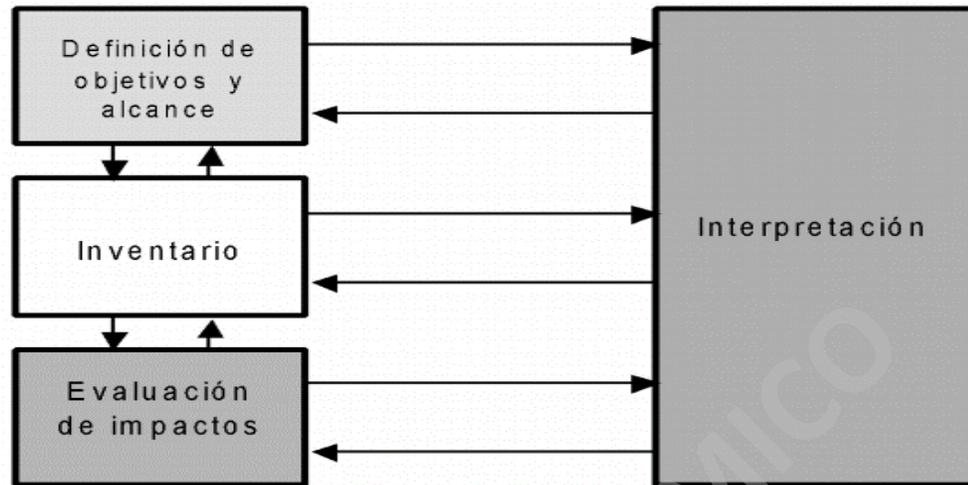
Para abordar esta investigación, se propone una metodología mixta que integre enfoques cuantitativos y cualitativos, permitiendo una evaluación exhaustiva de los sistemas constructivos en estudio, así como la propuesta de una zonificación basada en los resultados obtenidos:

- **Revisión Bibliográfica:** Se realizará una exhaustiva revisión de literatura, enfocándose en fuentes académicas, reportes del MOP y otras agencias gubernamentales que hayan documentado proyectos de vivienda social, documentación del BID, y otros estudios relevantes que aborden los sistemas constructivos en cuestión, especialmente en el contexto de vivienda unifamiliar en la región centro-sur de Chile. Esta revisión incluirá literatura sobre sostenibilidad, normativas locales, mapas geográficos, y estudios previos sobre zonificación aplicada a la construcción. Además, se buscarán estudios relacionados con la relación entre las características geográficas y climáticas y la elección de materiales constructivos.
- **Análisis de Estudios de Caso:** Se seleccionarán estudios de caso de proyectos de vivienda unifamiliar autoconstruida o de interés social llevada a cabo por el MOP, utilizando datos de acceso abierto y documentación disponible. Este análisis se centrará en recoger información específica sobre la implementación, costos, eficiencia y desempeño ambiental de los sistemas constructivos utilizados. Se aplicarán los criterios de evaluación ambiental del BID, incluyendo eficiencia energética, huella de carbono, uso de recursos, durabilidad y mantenimiento, impacto en la salud y bienestar.

Además, se incluirá la variable geográfica, evaluando cómo las condiciones de cada zona (clima, acceso a materiales, susceptibilidad a desastres naturales, etc.) influyen en la idoneidad de cada método constructivo (paneles de madera o prefabricación de hormigón), para con ello tener un marco de referencia más adecuado para desarrollar la zonificación. Los estudios de caso se analizarán tanto desde el punto de vista técnico como contextual, considerando las características socioeconómicas de cada región.

- **Análisis del Ciclo de Vida (ACV):** Se fundamenta en una revisión exhaustiva de la literatura existente y en el estudio de fuentes secundarias, basándose en los aportes de autores reconocidos en el campo de la construcción sostenible y el impacto ambiental de los materiales. La revisión bibliográfica permitió consolidar un marco teórico robusto que sustenta el ACV aplicado a los sistemas constructivos evaluados, considerando tanto las emisiones de carbono como la eficiencia energética y la sostenibilidad en la disposición final de materiales. Los datos recolectados de estudios previos se integraron para proporcionar una evaluación integral y comparativa del impacto ambiental de los sistemas de construcción en paneles de madera y prefabricación de hormigón, adaptados al contexto de la zona centro-sur de Chile (BID, 2020). Las fases del ACV se grafican en la Imagen 1.

Figura 5: Fases fundamentales del Análisis del Ciclo de Vida.



Fuente: Elaborado por BID (2020).

Basado en los resultados y conclusiones obtenidos del análisis, se identificarán los aspectos críticos, tales como los materiales y/o procesos que tienen mayor influencia sobre el impacto ambiental. Este análisis permitirá destacar los elementos del sistema constructivo que contribuyen de manera significativa a los impactos ambientales, ofreciendo una visión integral y detallada del desempeño ambiental del sistema estudiado.

- **Evaluación de Desempeño Ambiental:** Utilizando los criterios establecidos por el BID, se evaluará el desempeño ambiental de los materiales y tecnologías empleadas en los proyectos de construcción de vivienda social analizados, buscando identificar prácticas sostenibles y áreas de mejora (BID, 2021). Para un producto complejo de larga duración como lo es la vivienda, se divide su ciclo de vida en las siguientes etapas: la de producto (A1-A3), la de proceso de construcción (A4-A5), la de uso (B1-B7), la de fin de vida (C1-C4) y la de beneficios y cargas más allá del límite del sistema (D) (Imagen 3). Además, se graficarán los resultados del ACV en mapas georreferenciados para visualizar cómo las condiciones geográficas de la zona centro-sur afectan los impactos de cada sistema constructivo. Se considerarán para ello las características geográficas de la zona centro-sur de Chile, como clima, topografía y vulnerabilidad a desastres naturales (por ejemplo, terremotos) para identificar prácticas sostenibles específicas para cada región y proponer recomendaciones adaptadas a las características locales.

Figura 6: Aspectos a considerar en la Evaluación de desempeño ambiental de viviendas de paneles de madera u hormigón prefabricado



Fuente: Elaborado por BID (2021).

- **Propuesta de zonificación:** se incorporará en la zona regional elegida para identificar las áreas donde es más adecuado utilizar el sistema de prefabricación de hormigón y donde es preferible utilizar paneles de madera. Esta zonificación se basará en el análisis de las variables geográficas, climáticas, socioeconómicas y ambientales, así como en los resultados obtenidos de los análisis anteriores (eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad).

Para la construcción de esta zonificación, se utilizarán herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) básicas y Google Earth para superponer los datos obtenidos sobre los métodos constructivos con mapas geográficos detallados de la región. El proceso consistirá en:

- Recolectar datos geográficos (mapas climáticos, topográficos, de riesgo sísmico, etc.).
- Analizar la relación entre estos datos y la viabilidad de cada sistema constructivo en función de su desempeño.
- Crear mapas de zonificación que indiquen las áreas más adecuadas para la aplicación de los sistemas constructivos estudiados.

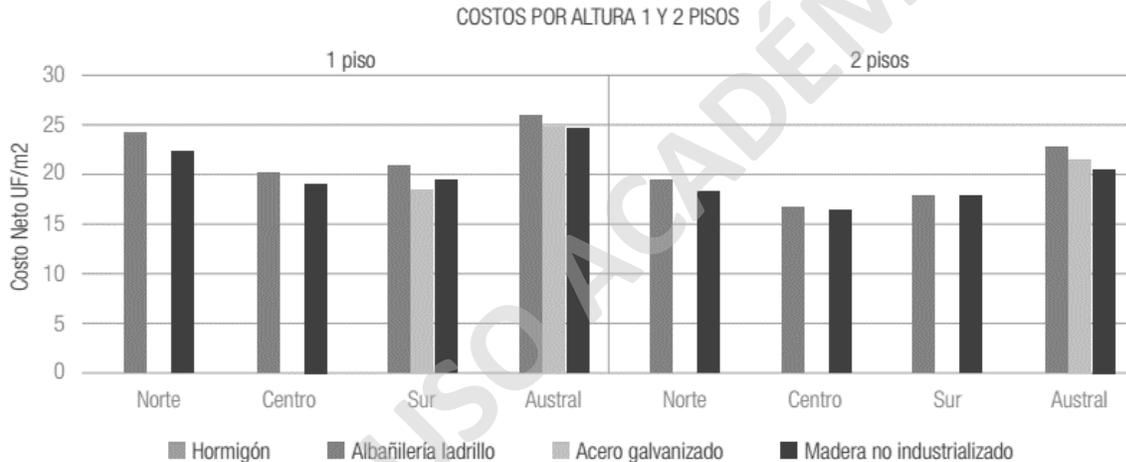
Finalmente, se validará la zonificación propuesta mediante entrevistas con expertos del MOP, arquitectos y urbanistas, así como revisando proyectos recientes de vivienda social en la región. Esta validación permitirá ajustar las zonas propuestas en función de la viabilidad técnica y práctica de las recomendaciones, asegurando que el modelo sea aplicable en contextos reales.

Resultados

4.1. Revisión bibliográfica

Un primer proyecto abordado evaluó una variedad de casos, manteniendo algunos con la tipología y materialidad original, y otros adaptados a materialidad de madera para construcciones de media altura. Con la colaboración de entidades públicas y privadas, se creó una base de datos para la evaluación de costos en proyectos a nivel nacional, permitiendo un análisis cuantitativo detallado. Los resultados indicaron que las construcciones de madera en edificaciones de uno y dos pisos son entre un 0,3% y un 6% más económicas que las construidas con albañilería o acero galvanizado, gracias a costos de construcción más bajos y un mejor rendimiento térmico (Figura 7)(CIUM-UC, 2021).

Figura 7: Costo aproximado para diferentes tipos de estructuras de hasta 2 pisos

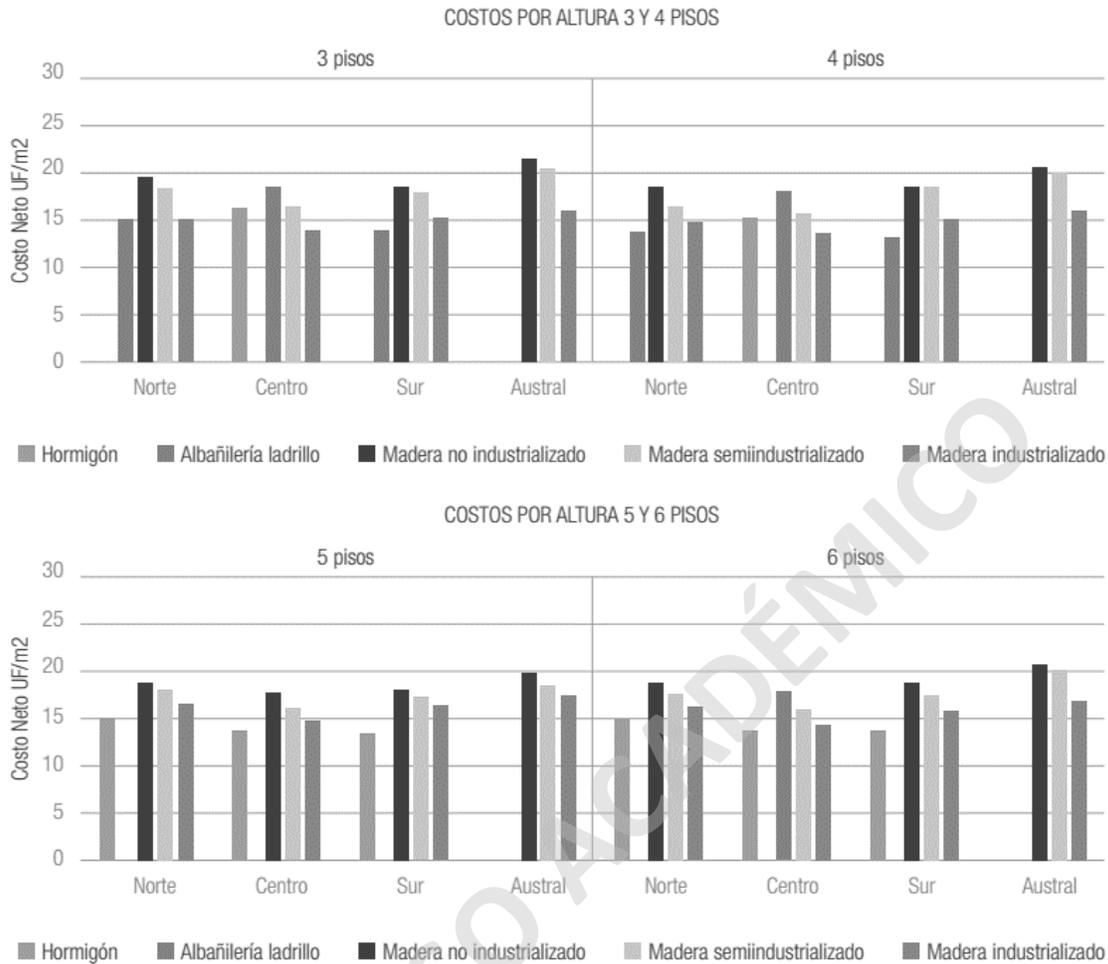


Fuente: Elaborado por CIUM-UC (2021).

Sin embargo, para edificaciones de tres a seis pisos, los costos aumentan debido a la necesidad de tecnologías de conexión más avanzadas y el cumplimiento de normativas estructurales y sísmicas, que incrementan el costo en aproximadamente un 5%. Este aumento puede ser reducido a cerca de un 1% mediante la adopción de procesos semi-industrializados (Figura 8).

La industrialización emerge entonces como un factor clave, especialmente para edificios de cinco a seis pisos, donde los costos directos todavía son entre un 6% y un 8% superiores a los de construcciones de materiales tradicionales, y pueden incrementarse entre un 15% y un 22% con procesos semi-industrializados dependiendo de la región geográfica.

Figura 8: Costo aproximado para tipos de estructuras en altura mayor a 3 pisos

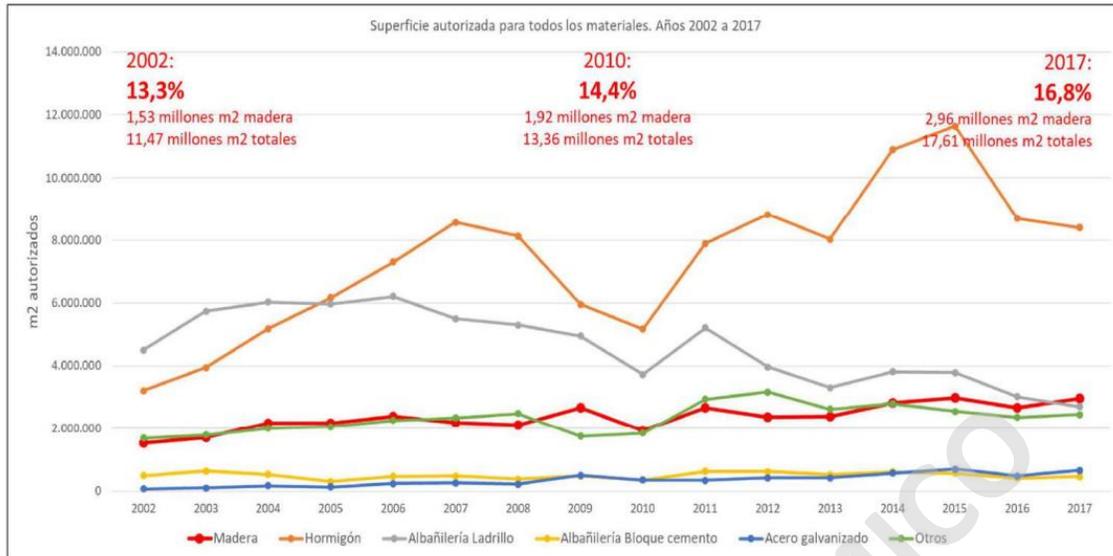


Fuente: Elaborado por CIUM-UC (2021).

El mismo análisis también destacó el potencial de ahorro energético de las construcciones en madera, con una posible reducción del 65% en gastos de calefacción, lo que equivale a un ahorro de aproximadamente 300 UF durante 60 años para un edificio de seis pisos en Santiago. A pesar de estos datos, el estudio subraya la necesidad de una mejor integración de las ventajas ambientales y de eficiencia de la madera en las regulaciones y políticas financieras para fomentar su uso más generalizado, enfatizando la importancia de adaptar la normativa para alinearla con los objetivos de eficiencia energética y neutralidad de carbono para 2050 (CIUM-UC, 2021).

Con datos del INE del 2002 al 2017, otro estudio del Centro UC de Innovación de la madera de Santa María et al. (2018), ha elaborado gráficas que muestran la evolución de la superficie autorizada para construcción en diferentes materiales en Chile entre los años 2002 y 2017. Se enfocan en cinco materiales principales: madera, hormigón, albañilería de ladrillo, albañilería de bloque de cemento, y acero galvanizado, además de una categoría denominada "otros".

Figura 9: Superficie autorizada para todos los materiales. Años 2002 a 2017



Fuente: Elaborado por Santa María et al. (2018). CIUM-UC con información estadística del INE.

A continuación se detallan algunos puntos clave de la Figura 9:

Madera:

- En 2002, la madera representó el 13.3% del total de la superficie autorizada, equivalente a 1.53 millones de metros cuadrados de un total de 11.47 millones.
- Este porcentaje creció a 14.4% en 2010, con 1.92 millones de metros cuadrados de un total de 13.36 millones.
- Para 2017, alcanzó un pico del 16.8%, con 2.96 millones de metros cuadrados de un total de 17.61 millones.
- Esto muestra un aumento constante en el uso de la madera, tanto en términos absolutos como relativos al total de construcciones.

Bloque de Cemento (Albañilería de bloque de cemento):

- A diferencia de la madera, la construcción con bloque de cemento muestran una tendencia relativamente constante y baja en comparación con otros materiales.
- Durante los años observados, este material mantuvo una presencia menor en el mercado, sin grandes picos o caídas dramáticas.

Comparación entre Madera y Bloque de Cemento:

- La madera muestra una tendencia creciente a lo largo del periodo, indicando un aumento en su aceptación y probablemente en la percepción de sus beneficios en términos de costos y eficiencia energética.
- En contraste, el bloque de cemento no muestra un aumento significativo, lo que podría reflejar limitaciones en términos de costos, preferencias de construcción o políticas de construcción habitacional.

Implicaciones para la Vivienda Social:

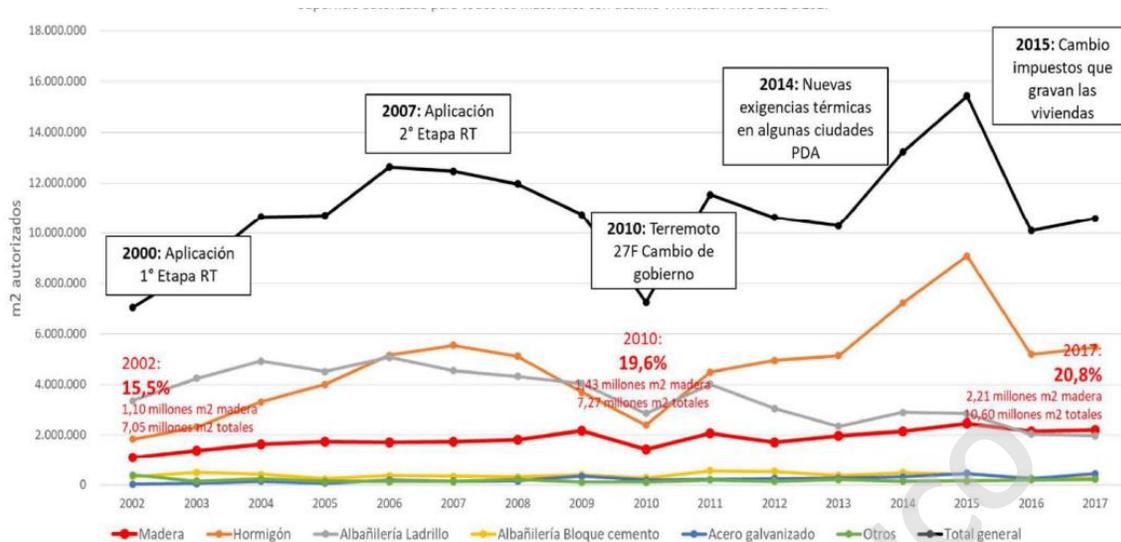
- El creciente uso de madera parece estar asociado a políticas de vivienda social que buscan materiales más económicos y sostenibles.
- La tendencia estacionaria del bloque de cemento sugiere que, aunque sigue siendo utilizado, no ha ganado la misma tracción que la madera en proyectos de vivienda social, posiblemente debido a una evaluación menos favorable en comparación con las ventajas de otros materiales.

El gráfico también muestra datos interesantes sobre el uso de hormigón, albañilería de ladrillo, acero galvanizado, y otros materiales, en comparación con la madera y el bloque de cemento:

- **Hormigón:** Este material muestra una tendencia generalmente ascendente hasta el año 2012, momento en el que alcanza su pico, y posteriormente experimenta una disminución. Sin embargo, el hormigón sigue siendo uno de los materiales más utilizados, lo que refleja su prevalencia en construcciones de infraestructura más grandes y duraderas, probablemente debido a su robustez y vida útil prolongada. Aunque en 2017 su uso disminuye, sigue siendo significativamente más alto en comparación con la madera y el bloque de cemento, indicando su firme posición en el sector de la construcción.
- **Albañilería de ladrillo:** Este material muestra un declive constante a lo largo del período observado. Inicialmente popular, su uso disminuye gradualmente, lo que podría reflejar un cambio en las preferencias de construcción o el aumento de costos relativos comparado con otros materiales como la madera. Esta disminución también puede estar influenciada por la adaptación a normativas más estrictas en eficiencia energética y sostenibilidad, donde materiales como la madera podrían tener ventajas.
- **Acero galvanizado:** El uso del acero galvanizado permanece relativamente constante y bajo en comparación con otros materiales como el hormigón y la madera. Este material se utiliza principalmente en tipos específicos de construcción que requieren durabilidad y resistencia particular, como en estructuras industriales y comerciales. La estabilidad de su uso podría indicar un nicho bien establecido en el mercado de la construcción.
- **Otros materiales:** Esta categoría, que incluye una variedad de otros materiales no especificados, muestra una tendencia relativamente constante a lo largo del tiempo. La estabilidad en el uso de estos materiales alternativos puede indicar que satisfacen necesidades específicas que no son cubiertas completamente por los materiales principales como la madera, el hormigón, o el acero.

En general, mientras que la madera muestra un aumento significativo y sostenido en su uso, reflejando tendencias hacia la sostenibilidad y eficiencia costal, el hormigón y el acero galvanizado demuestran ser pilares constantes en la construcción, ofreciendo características que los mantienen como preferidos para ciertos tipos de proyectos. La albañilería de ladrillo, en cambio, parece estar cediendo terreno ante materiales que ofrecen mejores prestaciones en términos de eficiencia energética y adaptabilidad a nuevas normativas de construcción.

Figura 10: Superficie autorizada para todos los materiales con destino vivienda. Años 2002 a 2017



Fuente: Elaborado por Santa María et al. (2018) CIUM-UC con información estadística del INE.

La Figura 10 muestra en cambio la evolución de la superficie autorizada para construcción en Chile en diversos materiales pero con destino exclusivo de vivienda, desde el año 2002 hasta 2017, destacando eventos significativos que influyeron en las tendencias de construcción, como cambios en regulaciones y desastres naturales. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes del gráfico:

Eventos clave:

- 2000: Aplicación de la 1ª Etapa de la Regulación Térmica (RT), que posiblemente influyó un aumento en la preferencia por materiales que cumplen con estas nuevas normas de eficiencia energética.
- 2007: Implementación de la 2ª Etapa de la RT, lo que probablemente llevó a un ajuste en los materiales usados, priorizando aquellos que mejoran el aislamiento y la eficiencia energética.
- 2010: Un terremoto significativo y el cambio de gobierno podrían haber estimulado políticas de reconstrucción y cambios en los materiales preferidos para garantizar una mayor seguridad y durabilidad.
- 2014: Nuevas exigencias térmicas en algunas ciudades dentro del Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA), lo que también pudo haber afectado las preferencias materiales.
- 2015: Cambios en los impuestos que gravan las viviendas, afectando posiblemente el costo y la elección de los materiales de construcción.

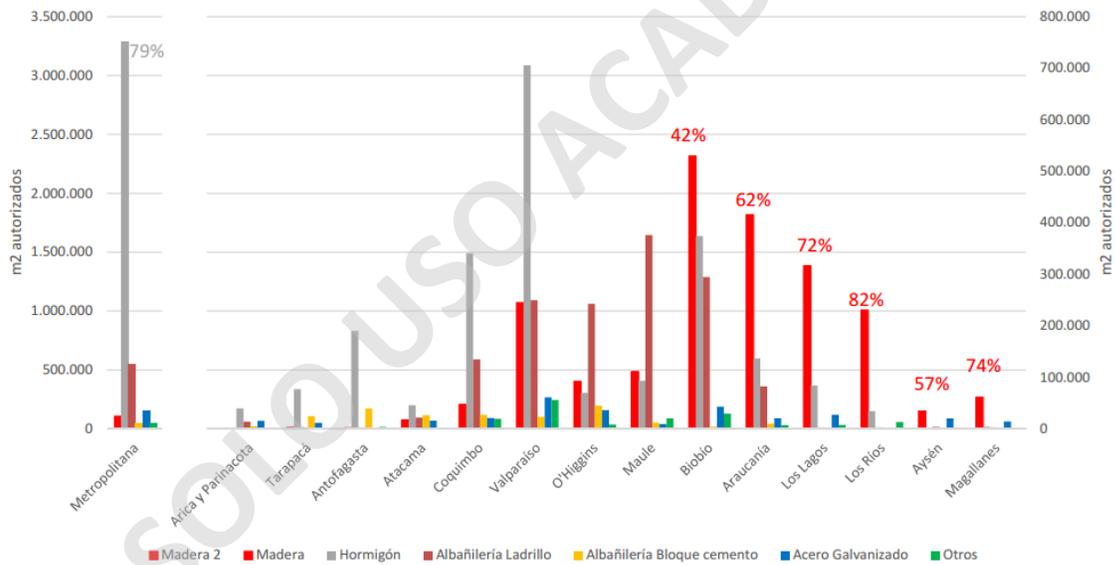
Datos de superficie autorizada para vivienda, según materiales:

- Madera: Se observa un aumento significativo en la superficie construida con madera desde un 15,5% del total en 2002 (1,10 millones m² de 7,05 millones m² totales) hasta un 20,8% en 2017 (2,21 millones m² de 10,60 millones m² totales). Esta tendencia al alza refleja una creciente aceptación de la madera, posiblemente debido a su sostenibilidad y eficiencia en costos.

- Hormigón y Albañilería de Ladrillo: Ambos materiales muestran fluctuaciones a lo largo del tiempo pero mantienen una presencia constante en el mercado, indicando que siguen siendo opciones populares para ciertos tipos de construcciones, especialmente donde se requiere robustez y durabilidad.
- Albañilería de Bloque de Cemento y Acero Galvanizado: Estos materiales mantienen una línea bastante plana a lo largo del período observado, lo que sugiere que su uso ha sido relativamente constante, sin grandes picos o caídas, y que son utilizados en aplicaciones específicas que no han experimentado grandes cambios en demanda.

La creciente proporción de construcciones de vivienda en madera podría entonces según estos datos estar relacionada con los esfuerzos por promover prácticas de construcción más ecológicas y eficientes energéticamente. Las fluctuaciones en el uso del hormigón y la albañilería pueden por otro lado, estar directamente relacionadas con los cambios en las regulaciones y las respuestas a eventos climáticos como terremotos, que demandan edificaciones más resistentes. El aporte del gráfico en todo caso está en que logre resaltar cómo factores externos como regulaciones, eventos naturales y políticas fiscales pueden influir significativamente en las tendencias de la industria de la construcción, afectando la elección de materiales y técnicas constructivas a lo largo del tiempo.

Figura 11: Superficie autorizada para todos los materiales con destino vivienda, según regiones. Año 2017



Fuente: Elaborado por Santa María et al. (2018) CIUM-UC con información estadística del INE.

En la figura 11, se consigue una visión detallada de la superficie autorizada para construcción de viviendas en diferentes regiones de Chile durante el año 2017, discriminada por materiales de construcción como madera, hormigón, albañilería de ladrillo, albañilería de bloque de cemento, acero galvanizado y otros. Aquí se muestran las diferencias regionales en las preferencias de materiales para construcción:

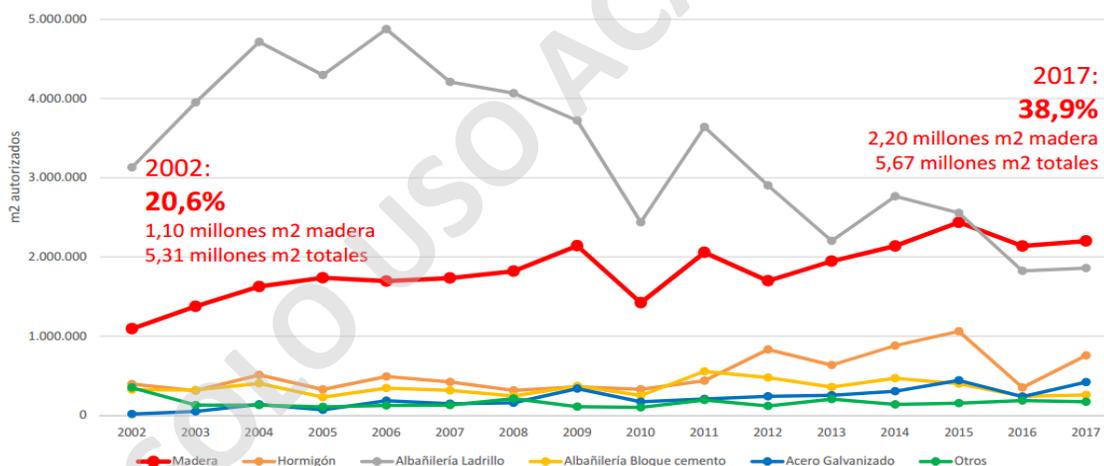
- En regiones como Aysén y Magallanes, la madera es el material predominante, ocupando el 82% y el 74% respectivamente del total de la superficie construida. Esto refleja la

preferencia regional por materiales tradicionalmente utilizados y más accesibles en estas áreas.

- En la Región Metropolitana, el uso de materiales es más diversificado, aunque la madera sigue siendo significativa. La Región de los Ríos también muestra una alta preferencia por la madera (72%), lo que puede estar influenciado por la disponibilidad local de recursos forestales.
- Las regiones de Biobío y Araucanía muestran también una fuerte inclinación hacia la madera con 62% y 57% respectivamente, indicando una tendencia generalizada hacia la construcción en madera en el sur de Chile. En contraste, en la Región de Antofagasta, el uso de madera es menos prominente, lo que podría estar relacionado con diferencias en las condiciones climáticas o económicas que favorecen otros materiales.
- El hormigón y el acero galvanizado son menos predominantes en la mayoría de las regiones, con excepciones en áreas específicas donde estos materiales pueden ser preferidos debido a requisitos estructurales o de diseño específicos.

El análisis de estos resultados refleja así, cómo la elección de materiales de construcción varía significativamente entre las regiones de Chile, influenciada por factores como la disponibilidad de recursos, el clima, y las tradiciones de construcción locales. La madera destaca como un material principal en varias regiones, especialmente en el sur y en áreas más aisladas.

Figura 12: Superficie autorizada con destino vivienda de uno y dos pisos. Años 2002-2017

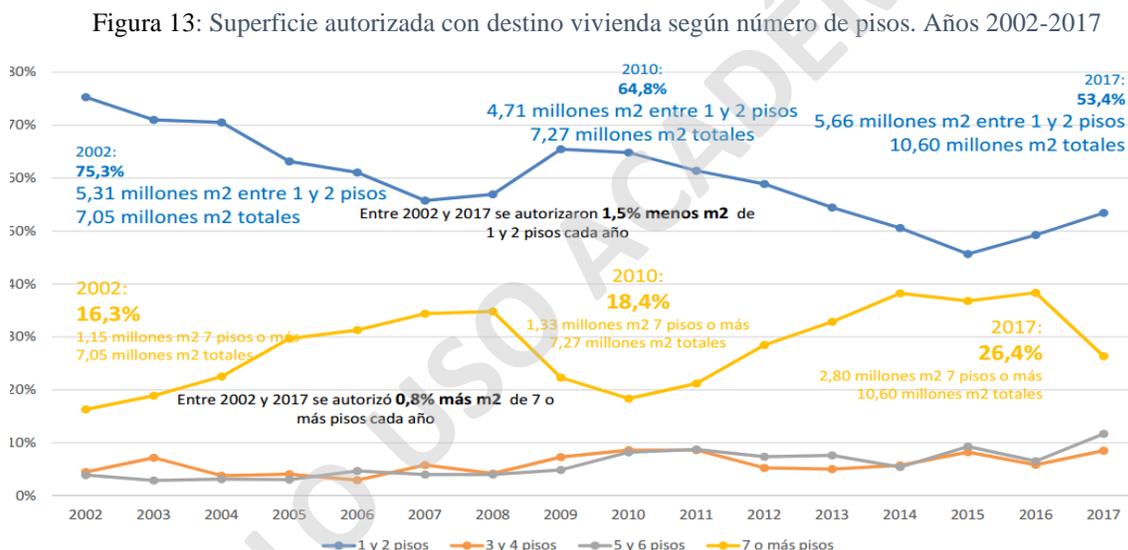


Fuente: Elaborado por Santa María et al. (2018) CIUM-UC con información estadística del INE.

La gráfica 12 muestra la evolución de la superficie autorizada para construcción de viviendas de 1 y 2 pisos en diferentes materiales en Chile, desde 2002 hasta 2017. Los datos reflejan cambios significativos en la elección de materiales a lo largo del tiempo, con un foco particular en el uso de la madera que en 2002, representaba el 20.6% del total de la superficie autorizada para viviendas de 1 y 2 pisos, equivalente a 1.10 millones de metros cuadrados de un total de 5.31 millones de metros cuadrados. Para 2017, esta cifra aumentó dramáticamente hasta el 38.9%, con 2.20 millones de metros cuadrados de un total de 5.67 millones de metros cuadrados. Este aumento destaca un cambio significativo hacia la preferencia por la madera en la construcción residencial de baja altura.

El hormigón y la albañilería de ladrillo muestran en cambio una tendencia generalmente estable a lo largo de los años, con fluctuaciones moderadas. Esto sugiere que, aunque no han sido desplazados por completo, su uso ha sido eclipsado por el incremento en la preferencia por la madera. La albañilería de bloque de cemento y el acero galvanizado también muestran estabilidad, pero con una presencia mucho menor comparada con la madera y el hormigón, indicando que estos materiales son opciones menos populares para viviendas de 1 y 2 pisos. El notable incremento en la proporción de madera puede ser atribuido a varios factores, incluyendo posibles cambios en la regulación, percepciones mejoradas de la sostenibilidad de la madera, y ventajas en costos y eficiencia de construcción y la estabilidad en la superficie total autorizada, con leves incrementos, sugiere entonces un crecimiento moderado en la construcción de viviendas de baja altura durante este período, con la madera ganando una parte significativa de este crecimiento.

La figura 13 en cambio, detalla la evolución de la superficie autorizada para la construcción de viviendas en Chile, segmentada por el número de pisos de los edificios entre 2002 y 2017, con lo cual, proporciona una comparativa entre las tendencias de construcción de edificaciones de baja altura (1 y 2 pisos) y aquellas de mayor altura (7 pisos o más).



Fuente: Elaborado por Santa María et al. (2018) CIUM-UC con información estadística del INE.

La figura 13 proporciona entonces una visión comprensiva sobre la evolución de la superficie autorizada para construcción de viviendas en Chile, mostrando un contraste en el desarrollo de edificaciones de baja y alta altura entre los años 2002 y 2017. Inicialmente, en 2002, las edificaciones de 1 y 2 pisos representaban un notable 75.3% del total construido, con una superficie de 5.31 millones de metros cuadrados de un total de 7.05 millones de metros cuadrados. Sin embargo, para 2017, esta proporción había disminuido a 53.4%, aunque el volumen de construcción aumentó a 5.66 millones de metros cuadrados de un total mucho mayor de 10.60 millones de metros cuadrados. Esta tendencia indica una reducción anual del 1.5% en la proporción de superficie destinada a viviendas de baja altura, reflejando un cambio en las preferencias o políticas de construcción.

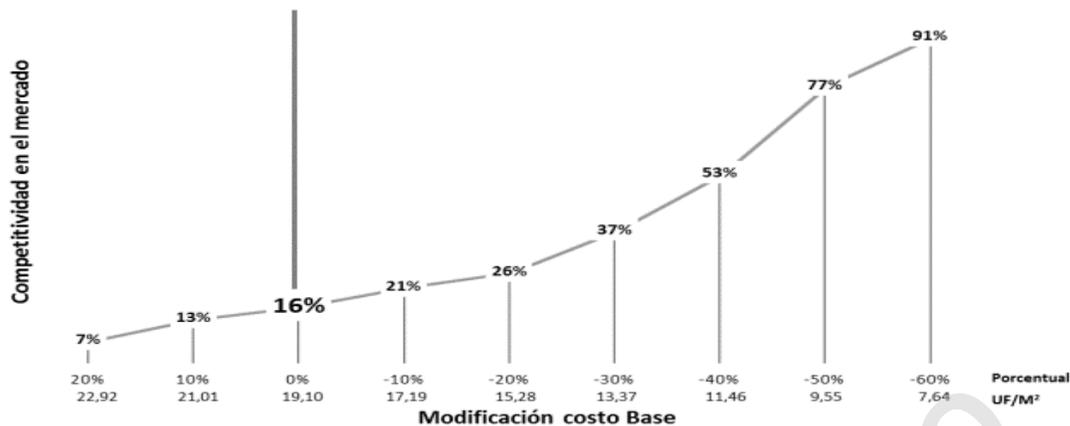
Por otro lado, la construcción de edificaciones de 7 pisos o más muestra un patrón de crecimiento inverso. En 2002, estas edificaciones constituyeron solo el 16.3% de la superficie construida, sumando 1.15 millones de metros cuadrados. Para 2017, esta cifra aumentó significativamente a 26.4%, lo que representa 2.80 millones de metros cuadrados. Este incremento anual del 0.8% en la superficie autorizada para edificaciones de mayor altura sugiere una tendencia hacia la verticalización en la construcción urbana.

La comparación con datos previos sobre el uso de la madera en construcciones de baja altura revela que, aunque el uso de madera como material predominante ha aumentado, la proporción de construcciones de baja altura ha disminuido en el total de la construcción. Esto podría estar relacionado con una urbanización más densa y la necesidad de optimizar el uso del espacio urbano en las ciudades chilenas. Esta transición hacia edificaciones de mayor altura podría estar influenciada por factores como los cambios en políticas urbanas, el aumento de la población urbana y la escasez de terrenos disponibles en áreas metropolitanas. Estas dinámicas son bienvenidas en materia de sostenibilidad, en tanto, indican un cambio en las estrategias de planificación urbana y las preferencias residenciales, que favorecen un desarrollo más vertical y posiblemente más sostenible en términos de uso del suelo urbano (Santa María et al., 2018).

Otro estudio importante sobre el tema es el de Cid, et al, (2017), para quienes actualmente, se enfrentan nuevos desafíos para mejorar los estándares de vivienda social, incorporando aspectos de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. En cuanto a las materialidades utilizadas, el hormigón armado y la albañilería dominan el mercado, con un notable espacio para la inclusión de la madera. Según los autores, datos del 2011 muestran que el hormigón armado constituye el 41.7% de las materialidades, seguido por la albañilería con el 24.5%, mientras que la madera representa solo el 13.9%. Su investigación utilizó datos de proyectos de vivienda social desarrollados por el Minvu y otras entidades, abarcando desde el año 2010 en adelante, y se centró en evaluar las posibilidades de la madera como una opción competitiva en costos, identificando que esta materialidad podría alcanzar una competitividad máxima del 16% en el mercado.

El análisis descriptivo regional y nacional les sugirió que, en regiones como Antofagasta, Metropolitana y Aysén, los costos de construcción en madera se encuentran dentro del 50% central de los datos, lo que sugiere su potencial competitivo. Los resultados muestran que la desviación estándar de los costos es variable, lo que implica una diversidad en los costos de construcción que podría relacionarse con factores como la disponibilidad de mano de obra y las características específicas de los proyectos. A nivel nacional, existe en cambio una oportunidad de aumentar la participación de mercado en un 5% adicional si se logra una reducción de costos del 10%. Su estudio subraya en todo caso, la importancia de seguir investigando y adaptando las prácticas de construcción para mejorar la competitividad y sostenibilidad de la vivienda social en Chile, destacando nuevamente a la madera como una alternativa viable en términos de costos y eficiencia.

Figura 14: Competitividad en el mercado en función de la variación de costos en base nacional



Fuente: Elaborado por Cid, et al., (2017).

La figura 14 ilustra entonces cómo la competitividad de la construcción en madera en el mercado de vivienda social en Chile varía en función de los cambios en los costos de construcción. La línea azul muestra la competitividad en el mercado de la madera como material de construcción, y la barra roja representa el punto actual de competitividad al 16%. La escala horizontal del gráfico muestra porcentajes de reducción en el costo base, desde un aumento del 20% hasta una reducción del 60%. Estos porcentajes reflejan modificaciones hipotéticas en el costo de construcción en madera desde el valor base actual de 19,10 UF/m², mostrando cómo estos cambios podrían influir en la participación de mercado de la construcción en madera (Cid, et al., 2017).

La competitividad inicial de la madera es del 13% con un costo base de 21,01 UF/m². Al reducir el costo base a 19,10 UF/m², la competitividad se eleva al 16%, como se señala con la barra roja. Si el costo se reduce un 10% adicional (a 17,19 UF/m²), la competitividad se incrementa al 21%. Esta tendencia continúa de manera que, al reducir los costos en un 60% respecto al valor base (a 7,64 UF/m²), la competitividad de la madera alcanza hasta el 91% en el mercado. Estos datos sugieren entonces que reducciones significativas en los costos de construcción en madera podrían hacerla extremadamente competitiva en el mercado de vivienda social, potencialmente permitiendo que esta materialidad supere otras opciones tradicionales como el hormigón y la albañilería, especialmente en contextos donde la eficiencia de costos es crucial.

Pero muy a pesar de los hallazgos del estudio de Cid et al. que destacan la potencial competitividad coste-efectiva de la madera en la construcción de viviendas sociales en Chile, es fundamental reconocer que la elección de materialidades en la industria de la construcción no se rige exclusivamente por el precio. Los análisis previos muestran que diversos factores, incluidos los ambientales, de sostenibilidad, normativas de construcción y las políticas de promoción estatal, juegan un papel crucial en la determinación de los materiales utilizados en proyectos habitacionales. En particular, la madera ha recibido un fuerte apoyo estatal, lo que ha fomentado su uso creciente, no solo en construcciones de baja altura, sino también como una alternativa viable en estructuras más complejas y de mayor escala.

En contraste, la opción de prefabricados con bloque de concreto no ha experimentado un crecimiento significativo en el tiempo, y con la creciente promoción de la madera, su uso

amenaza con declinar aún más. Aunque en edificaciones de más de tres pisos la madera todavía no se ha establecido fuertemente, reemplazar materiales como el concreto y el acero en este segmento del mercado representa un desafío considerable. Estos materiales continúan siendo preferidos en muchas construcciones de mayor altura debido a sus propiedades de resistencia y durabilidad, factores que son difíciles de igualar incluso con los avances en las tecnologías de construcción en madera.

4.2. Estudios de caso de modelos comparados en madera y concreto prefabricado

4.2.1. Caso de Estudio 01

Aliaga Villarroel (2022), llevó adelante un estudio de caso comparado enfocado en aspectos como la durabilidad, donde se evaluó la vida útil estimada de estructuras prefabricadas de cemento y madera según su durabilidad, resistencia a condiciones ambientales adversas y su resistencia al fuego (Tabla 17).

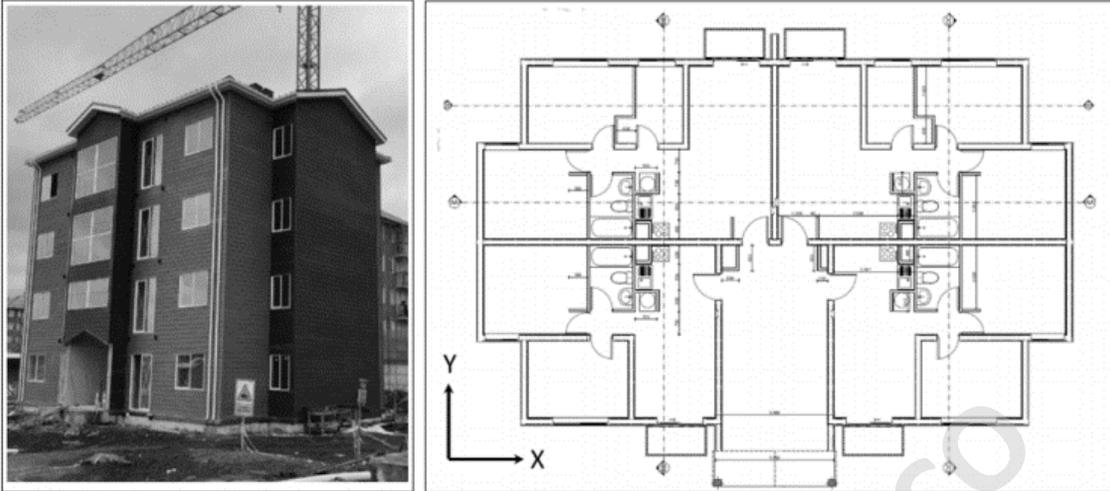
Tabla 17: Ficha Técnica del Caso 01

Característica	Detalle
Ubicación	San Pedro de La Paz, provincia de Concepción, región del Biobío, Chile
Tipo de edificio	Edificios de apartamentos
Cantidad de edificios	5
Pisos por edificio	4
Altura total	11 metros
Altura entre pisos	Primer piso: 2.79 m - Segundo y tercer piso: 2.54 m - Cuarto piso: 2.59 m
Cerchas	0.8 metros de alto
Dimensiones máximas de planta	Longitudinal: 19.26 m -Transversal: 11.74 m
Simetría	Simétrico respecto a la línea central del eje X
Área por nivel	Primeros tres pisos: 202 m ² - Último piso: 220 m ²
Cantidad de departamentos	80

Fuente: Elaboración propia sobre Aliaga Villarroel (2022)

Como dato adicional a considerar el proyecto "Horizonte del Pacífico" está diseñado para cumplir con rigurosos estándares sísmicos en la "Zona 3" de alta sismicidad. Se clasifica en la "Categoría II" para estructuras de importancia significativa, construido sobre "Suelo D" que puede influir notablemente en la respuesta sísmica.

Figura 15: Caso 01: Vista y distribución del edificio de condominio que alberga vivienda social en Concepción, Chile



Fuente: (Aliaga Villarroel, 2022)

En el análisis comparativo entre los diseños de edificios utilizando madera y hormigón prefabricado, se observan diferencias significativas en términos de costos, tiempos de construcción y aspectos constructivos, aunque ambos materiales siguen una secuencia constructiva similar debido a su naturaleza prefabricada.

En cuanto a los costos, la edificación en madera presenta un costo directo estimado de aproximadamente 10.500 UF, con la obra gruesa y las instalaciones como los mayores gastos, representando el 71% y el 26% del costo total, respectivamente. Por otro lado, la edificación en hormigón prefabricado tiene un costo estimado de 11.300 UF, con la obra gruesa constituyendo el 75% y las instalaciones el 21% del total. Esto resulta en una ventaja costal de un 5% para la madera sobre el hormigón prefabricado, equivalente a una diferencia de 517 UF.

Respecto a los tiempos de construcción, la madera ofrece ventajas en casi todas las partidas consideradas, con una ventaja general del 20% en el cronograma total de construcción sobre el hormigón prefabricado. Específicamente, el montaje de elementos prefabricados en madera es un 45% más rápido que en hormigón, lo cual puede atribuirse a la menor masa y a la mayor eficiencia en el montaje debido a la tecnología avanzada en el montaje de paneles de madera.

Ambos materiales cumplen con los requisitos estructurales y de durabilidad, aunque cada uno tiene sus propias ventajas y limitaciones que influyen en su selección dependiendo de las especificaciones del proyecto y las preferencias en cuanto a sostenibilidad, costos y tiempo.

Para una presentación clara y concisa de la comparación entre los sistemas constructivos utilizando madera y hormigón prefabricado, la tabla 18 resume los resultados principales basados en los aspectos de costo y tiempo de construcción conseguidos en este proyecto:

Tabla 18: Resultados comparados del Caso 01

<i>Aspecto Comparado</i>	<i>Madera</i>	<i>Hormigón Prefabricado</i>	<i>Diferencia (UF)</i>	<i>(% o)</i>
<i>Costo Directo Estimado (UF)</i>	10,500	11,300	Madera es 7.1% más económica	
<i>Obra Gruesa (Costo % del total)</i>	71%	75%	4% menos en madera	
<i>Instalaciones (Costo % del total)</i>	26%	21%	5% más en madera	
<i>Tiempo de Montaje (ventaja %)</i>	45% más rápido	-	45% ventaja para la madera	
<i>Ventaja General en Tiempo</i>	20% más rápido en total	-	20% ventaja para la madera	
<i>Costo Obra Gruesa (diferencia UF)</i>	746 UF menos	-	746 UF ventaja para la madera	
<i>Costo Instalaciones (diferencia %)</i>	13% más caro	-	13% más caro en madera	
<i>Costo Terminaciones (diferencia %)</i>	28% menos	-	28% ventaja para la madera	

Fuente: Elaboración propia sobre Aliaga Villarroel (2022)

A partir de la comparación detallada entre el uso de madera y hormigón prefabricado en la construcción de un mismo proyecto, podemos llegar a varias conclusiones clave a partir de este caso donde aunque ambos materiales tienen sus propios méritos y limitaciones, la madera emerge como una opción competitiva y favorable para este proyecto específico, ofreciendo ventajas significativas en costos y tiempos de construcción, así como beneficios potenciales en sostenibilidad. Sin embargo, la decisión final debería considerar también otros factores específicos del proyecto, como requisitos de diseño, regulaciones locales, y preferencias del cliente o desarrollador.

La construcción utilizando madera presenta entonces una ventaja significativa en términos de costo directo total, siendo aproximadamente un 7.1% más económica que el hormigón prefabricado. Esta diferencia se atribuye principalmente a los costos reducidos en la obra gruesa y las terminaciones, aunque es importante destacar que los costos de instalaciones son mayores en madera. En términos de tiempos de construcción, la madera ofrece a su vez una ventaja notable, con un proceso de montaje un 45% más rápido y un cronograma total de construcción un 20% más corto en comparación con el hormigón prefabricado. Esta ventaja temporal es crucial en proyectos donde el tiempo de entrega es un factor crítico.

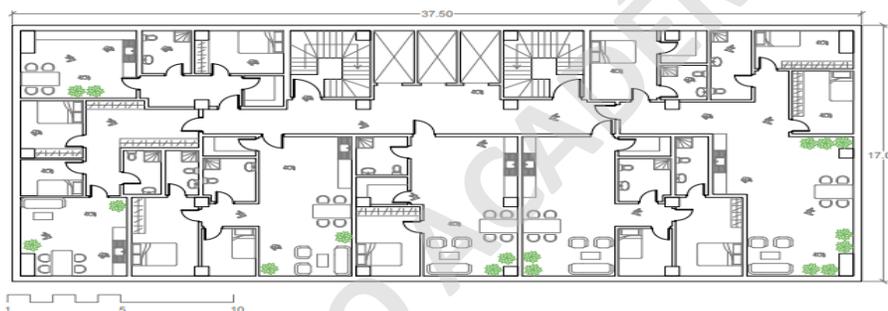
Aunque no fue profundamente detallado en los datos suministrados, generalmente la madera es considerada más sostenible que el hormigón, especialmente si proviene de fuentes gestionadas de manera sostenible. Su capacidad para almacenar carbono y su menor impacto ambiental durante la producción la hacen atractiva desde una perspectiva de construcción verde. Mientras que la madera proporciona beneficios en términos de ligereza y flexibilidad, lo que es favorable en zonas sísmicas, el hormigón prefabricado ofrece por su parte robustez y durabilidad, aunque con una flexibilidad reducida y un peso considerable que puede afectar el diseño estructural y los cimientos.

La elección del material en todo caso puede verse influenciada por la percepción cultural y la aceptación local del material. En algunos contextos, el hormigón puede ser visto como más duradero y seguro, mientras que la madera puede ser preferida por su estética y cualidades térmicas.

4.2.2. Caso de Estudio 02

Este otro estudio, realizado por Juárez Montilla (2020) es de gran interés por usar de inspiración para su desarrollo a la torre Mjøsa, una infraestructura noruega de 18 plantas destinada a tres usos distintos: vivienda, hotel y oficinas (Tabla 19). Actualmente es la torre con estructura de madera más alta del mundo, con un total de 85,4 m de altura. En Chile no existe aún ningún edificio de madera de estas dimensiones y el aporte de esta investigación radica en haber sometido el mismo prototipo -en condiciones teóricas- a variables de diseño en madera y en prefabricado de concreto (Figura 16).

Figura 16: Caso 02: Distribución en planta de piso tipo residencial en Torre Mjøsa. Noruega



Fuente: (Juárez Montilla, 2020)

Tabla 19: Ficha Técnica del Caso 02

Característica	Detalle
Nombre del Proyecto	Torre Mjøsa
Ubicación	Brumunddal, al norte de Oslo, Noruega
Arquitecto/Estudio	Voll Arkitekter
Año de Finalización	Marzo de 2019
Altura Total	85.4 metros
Número de Plantas	18
Usos	Vivienda, hotel y oficinas
Dimensiones de Planta	37.5 metros de largo x 17 metros de ancho
Estructura Principal	Pórticos de vigas y pilares de madera laminada encolada (GLULAM)
Elementos Complementarios	Balcones y núcleo de comunicaciones en paneles de CLT
Fachada	Paneles sándwich fijados a las vigas
Forjados	Planta 2 a 11: madera laminada prefabricada - Plantas superiores: hormigón prefabricado

Características de Construcción	Completamente prefabricado, construcción rápida con grúa, un piso por semana
Beneficios de Construcción	Menor tiempo de construcción y reducción de costos laborales por no requerir andamios

Fuente: elaboración propia sobre Juárez Montilla (2020)

En el desarrollo experimental realizado por Juárez Montilla en 2020 se compararon ambos materiales de construcción: hormigón armado y madera contralaminada o CLT con sus respectivas fortalezas y debilidades (Tabla 20). El hormigón utilizado fue el HA-25, adaptado a climas con corrientes aéreas marinas y baja agresividad química, reforzado con acero de alto límite elástico. Por otro lado, la madera contralaminada se compuso de paneles formados por tablas encoladas en capas cruzadas, caracterizándose por su estabilidad dimensional y su anisotropía, que implica una resistencia significativamente menor cuando las cargas se aplican perpendicularmente a las fibras.

La estructura de hormigón armado contempló vigas planas y pilares de sección cuadrada, mientras que en el caso de la madera, se utilizaron vigas de canto y pilares similares, con un forjado prefabricado de CLT. Ambas estructuras compartieron el tipo de fachada ventilada, aunque difirieron en los forjados superiores, siendo de hormigón prefabricado en el caso de la madera para aumentar la carga y contrarrestar los fuertes vientos.

El estudio destacó un menor impacto ambiental de la madera en comparación con el hormigón, especialmente en las fases de reciclaje y reutilización. No obstante, la madera mostró un mayor uso de energía a lo largo de sus fases de vida, aunque esta energía es principalmente renovable. La madera también presentaría desafíos específicos como la higroscopicidad y la vulnerabilidad a agentes xilófagos, que pueden comprometer su estructura.

En términos de construcción, la madera contralaminada permite una ejecución más rápida gracias a su naturaleza prefabricada, que facilita la instalación con grúa y requiere menos trabajo de andamiaje, permitiendo construir un piso por semana. En cambio, la construcción con hormigón in situ es más lenta, requiere encofrado y apuntalamiento y es más susceptible a condiciones climáticas, lo que puede impactar la calidad y el ritmo de trabajo.

Finalmente, el análisis mostró que, aunque el hormigón puede ser efectivo para resistir cargas horizontales como el viento gracias a su rigidez, la madera necesita estrategias adicionales como arriostramientos o la combinación con hormigón para garantizar estabilidad en estructuras altas. La madera, por ser más ligera, también ofrece la ventaja de requerir menos capacidad estructural para soportar su propio peso, lo que es crucial en edificaciones altas donde el viento y otros factores dinámicos son significativos.

Tabla 20: Fortalezas y debilidades de cada material descritas para el Caso 02

Aspecto	Madera Contralaminada - Fortaleza	Madera Contralaminada - Debilidad	Hormigón Armado - Fortaleza	Hormigón Armado - Debilidad
Opinión pública	-	Negativa por la deforestación. No se tiene en cuenta la sostenibilidad.	Aceptado por ser el más habitual	-

<i>Lugares de producción</i>	-	Solo uno en España	En casi todas las CCAA	-
<i>Agentes naturales</i>	-	No tolera grandes cambios de humedad relativa. Aparición de agentes xilófagos.	-	La armadura puede sufrir corrosión
<i>Peso propio</i>	Más ligera	-	-	4,5 veces más pesada
<i>Luces</i>	Luces de 11 m	-	-	Luces de 7 m
<i>Altura</i>	-	Limitado por el viento debido a su bajo peso propio	No supone ningún problema	-
<i>Arriostramiento</i>	Por la fachada	-	Nudos rígidos	-
<i>Materiales auxiliares de construcción</i>	Solo una grúa	-	Encofrado, puntales, grúa...	-
<i>Impacto medioambiental</i>	Bajas emisiones nocivas	-	-	Muy altas emisiones nocivas
<i>Demanda de energía</i>	Alta, pero la mayoría renovable	-	Menor, pero no renovable	-
<i>Reciclaje</i>	La mayoría de lo producido se reutiliza	-	-	Proceso muy complejo, no siempre se lleva a cabo

Fuente: (Juárez Montilla, 2020)

Aunque el hormigón armado es el material predominante debido a su familiaridad y accesibilidad en múltiples localidades del país, la madera contralaminada emerge entonces como una alternativa sostenible y más ligera. Sin embargo, esta ligereza puede convertirse en una desventaja en estructuras esbeltas y altas expuestas a fuertes vientos, requiriendo soluciones como forjados de hormigón en pisos superiores o sistemas de arriostramiento específicos para estabilizar la estructura.

En cuanto a las propiedades físicas, la madera permite cubrir mayores luces con menos material y peso en comparación con el hormigón, que requiere incrementar el canto del forjado para extender las luces, aumentando así el peso total de la estructura. Además, la producción limitada de madera contralaminada (en Chile más concentrada en el sur del país), representa un desafío logístico y económico, ya que el transporte a grandes distancias incrementa los costos y el impacto ambiental.

Desde la perspectiva ambiental, la madera contralaminada es por lo tanto más favorable, especialmente en las fases de reciclaje y reutilización, donde supera al hormigón armado en términos de impacto ecológico. Aunque el hormigón utiliza más energía a lo largo de su ciclo de vida, la energía empleada en la producción de madera es en su mayoría renovable, y en un análisis completo incluyendo el reciclaje, la demanda energética de la madera es menor.

El caso de estudio 2 lograría entonces destacar las debilidades inherentes a la madera, como su sensibilidad a la humedad y la susceptibilidad al ataque de agentes xilófagos, aunque estas no representan un problema en entornos interiores protegidos. Tratamientos protectores pueden mitigar estos problemas, ampliando la viabilidad de la madera contralaminada en diversas aplicaciones constructivas.

4.2.3. Caso de Estudio 03

Un estudio de Flores Pineda (2022), evaluó la viabilidad de utilizar madera contralaminada (CLT) en comparación con la albañilería confinada para la construcción de viviendas sociales, enfocándose en aspectos de gestión e impacto ambiental. El proyecto en estudio corresponde a una unidad del SERVIU N° 97-597-04 en Huechuraba, catalogada estructuralmente en zona sísmica II, tipos de suelo B y categoría de ocupación II (Tabla 21).

El análisis reveló que el CLT, aunque ofrece beneficios significativos en términos de reducción de tiempo de construcción y huella de carbono, presentaría un costo de construcción considerablemente mayor en comparación con la albañilería confinada. Específicamente, el costo de construcción del CLT fue más del doble que el de la albañilería, con una diferencia de 3,02 UF/m², lo que representa un aumento del 247.3% sobre el costo de la albañilería. Sin embargo, el CLT demostró ser más eficiente en términos de tiempo, reduciendo el plazo de construcción a solo el 30.6% del tiempo requerido para la albañilería. Esto implica un ahorro de casi 3.8 meses, un factor crítico que podría acelerar la disponibilidad de viviendas sociales.

Desde la perspectiva del impacto ambiental, la madera contralaminada mostró una considerable ventaja, produciendo solo el 46.75% de la huella de carbono en comparación con la albañilería. Este resultado subraya la sostenibilidad superior del CLT, alineándose con los objetivos globales de reducción de emisiones de carbono en la construcción.

Figura 17: Caso 03: Vista 3D del modelado básico en SAP para el proyecto de vivienda social en Huechuraba



Fuente: (Flores Pineda, 2022)

No obstante, se identificaron preocupaciones específicas relacionadas con la durabilidad del CLT, particularmente su sensibilidad a la humedad y su necesidad de protecciones adicionales contra la humedad y el fuego. Estos desafíos requieren consideraciones de diseño especiales y medidas preventivas para asegurar la integridad a largo plazo de las estructuras de CLT, especialmente en climas variables.

Tabla 21: Caso 03: Resultados comparativos obtenidos según materialidad

DIMENSIÓN	INDICADOR	MEDIDA	A.C	CLT
GESTIÓN	Costo de construcción	UF/m ²	2,05	5,07
	Plazo de construcción	Meses	5,55	1,7
IMPACTO AMBIENTAL	Huella de carbono	KgCO ₂ eq	77.072	36.034

Fuente: (Flores Pineda, 2022)

El estudio concluyó que, mientras el CLT ofrece ventajas en términos de reducción de tiempo e impacto ambiental, los costos más altos y las preocupaciones de durabilidad deben ser meticulosamente evaluados para determinar su aplicabilidad en proyectos de vivienda social en Chile. Se sugiere que la política habitacional del país podría beneficiarse de la incorporación del CLT, considerando análisis financieros a largo plazo que podrían justificar la inversión inicial más alta en vista de los ahorros operativos y beneficios ambientales. Además, se recomienda avanzar en la investigación y desarrollo (I+D) para superar las limitaciones técnicas del CLT y explorar su potencial completo en la construcción sostenible.

A partir de los casos revisados, es posible entonces comenzar a establecer el paralelismo entre las técnicas que se desea comparar. En el proceso de instalación por ejemplo, utilizando elementos prefabricados, tanto en madera como en hormigón, se presentan etapas claves que aseguran la precisión y la eficiencia de la construcción.

En la fase inicial, ambos materiales requieren que las piezas sean producidas en fábrica y posteriormente trasladadas al sitio de construcción. La preparación del terreno es fundamental, necesitando un espacio plano, seco y limpio para almacenar adecuadamente los elementos, evitando así daños o deformaciones. En este punto, la madera y el hormigón comparten la necesidad de organización logística, pero difieren en los detalles específicos del almacenamiento y soporte, ya que la madera, siendo más susceptible a las condiciones ambientales, necesita cuidados adicionales contra la humedad.

Una vez en obra, la identificación y la inspección de las piezas es crucial. La madera requiere una verificación detallada de grietas y la integridad de los componentes, mientras que en el hormigón, además de las imperfecciones visuales, se verifica la adecuación estructural para soportar las cargas durante y después del montaje. La utilización de grúas para el posicionamiento de las piezas es común en ambos métodos; sin embargo, las técnicas y herramientas de montaje divergen significativamente.

En la instalación de madera, el proceso se centra en la precisión del ensamblaje. Los paneles de madera se fijan entre sí y a la fundación usando tornillos, clavos y adhesivos, lo que permite una construcción rápida y eficaz. Las conexiones entre paneles y la estructura principal se realizan con herrajes metálicos y pasadores autoperforantes, lo que facilita ajustes en sitio y una rápida adaptación a las condiciones de montaje.

Por otro lado, la instalación de paneles de hormigón implica procedimientos más laboriosos. Tras el posicionamiento inicial, se realiza el ajuste manual y se asegura la alineación vertical mediante puntales. La aplicación de *grouting*¹² para sellar las uniones es un paso que no tiene equivalente directo en la construcción de madera, donde las uniones son más secas y menos dependientes de procesos que requieran fraguado. El proceso de hormigón finaliza con el vaciado adicional de hormigón en las juntas, lo cual es crucial para la integridad estructural, mientras que en madera, las conexiones se consolidan mediante la fijación mecánica directa y el uso de adhesivos.

En otra instancia, al analizar y comparar los cronogramas de construcción para edificaciones en madera y hormigón prefabricado, se observan diferencias significativas en términos de la duración y secuencia de las etapas del proyecto. A continuación sintetizando los hallazgos usando como indicador una infraestructura de 4 pisos de altura que permita comparar tiempo invertido en procedimientos.

Es así que, en las construcciones de madera, el ritmo de montaje es notablemente rápido, alcanzando entre 300 a 600 metros cuadrados por día, aunque se estima un promedio más conservador de 300 metros cuadrados diarios. Sin embargo, este ritmo acelerado debe considerar actividades adicionales que pueden incrementar el tiempo total de construcción en un 50%, tales como la instalación de presoleras, el aseguramiento del aplomado de los muros, y la fijación y conexión de los elementos estructurales. Estas actividades son cruciales para garantizar la estabilidad y alineación adecuada de la estructura.

Con un proceso detallado que integra estos pasos adicionales, el proyecto en madera tiene un plazo total de ejecución de 96 días laborables, equivalentes aproximadamente a cinco meses corridos. Este cronograma también refleja que las etapas de excavación, relleno, y fundación, ocupan una parte considerable del tiempo total, extendiéndose más de 30 días hábiles.

Por otro lado, en las edificaciones de hormigón prefabricado, el proceso de montaje de losas y paneles de muros se completa en 26 días, con un 10% adicional de tiempo dedicado a conexiones húmedas, sumando un total de 29 días para estas actividades. Aunque el proceso de montaje es relativamente rápido, la duración total del proyecto es mayor, alcanzando 120 días laborables, o aproximadamente 6.2 meses corridos. Al igual que en las construcciones de madera, las partidas de excavación, relleno, y las bases fundamentales como las fundaciones y radier, toman un segmento considerable del cronograma, extendiéndose más de 40 días hábiles.

¹² El "*grouting*" es un proceso utilizado en la construcción que involucra la inyección o aplicación de una mezcla fluida, generalmente compuesta por agua, cemento y a veces aditivos, en espacios o cavidades para mejorar la resistencia estructural o para sellar y prevenir filtraciones. El *grouting* es esencial para asegurar la uniformidad, estabilidad y durabilidad de las estructuras, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto mediante la selección adecuada de la mezcla y los aditivos correspondientes.

Ambas metodologías comparten entonces similitudes en cuanto a la importancia y duración de las etapas de preparación del terreno y fundación, reflejando que estos pasos son cruciales en cualquier tipo de construcción. No obstante, la principal diferencia radica en la eficiencia del tiempo de montaje y la naturaleza de las conexiones. Mientras que la madera permite un montaje más veloz y modificaciones en sitio, el hormigón requiere un enfoque más meticuloso en las conexiones y un tiempo adicional para el curado y aseguramiento de la estructura, lo que puede extender la duración total del proyecto. Estas diferencias hacen que cada material sea más adecuado para diferentes tipos de proyectos y requerimientos de construcción.

Al comparar los costos directos asociados a la construcción de un prototipo de edificación de cuatro pisos en madera y hormigón prefabricado, se revelan a su vez, diferencias notables que reflejan la naturaleza y las implicancias económicas de cada material y método constructivo.

Para la edificación en madera, el costo directo estimado es de aproximadamente 10.500 Unidades de Fomento (UF). Dentro de este presupuesto, la obra gruesa y las instalaciones representan las mayores proporciones de gasto, con un 71% y un 26% del costo total, respectivamente. Este alto porcentaje en la obra gruesa se debe a la naturaleza del material y a las técnicas especializadas requeridas para su correcta instalación y montaje. La madera, al ser un material ligero y de fácil manipulación, permite ciertas economías en el proceso constructivo, pero requiere precisión en la fabricación y montaje para asegurar la integridad estructural y el cumplimiento de las normativas de construcción. Las instalaciones, por otro lado, pueden ser más costosas en términos relativos debido a la necesidad de integrar sistemas de aislamiento y protección contra incendios adecuados para este tipo de estructuras.

En contraste, la edificación en hormigón prefabricado presenta un costo directo estimado de alrededor de 11.300 UF. Aquí, la obra gruesa absorbe un mayor porcentaje del costo total, con un 75%, mientras que las instalaciones representan un 21%. El costo incrementado en la obra gruesa se atribuye al proceso de fabricación de los paneles de hormigón y a las técnicas de montaje que requieren maquinaria pesada y más mano de obra especializada. Además, el hormigón, siendo un material más pesado y robusto, implica costos adicionales en el transporte y la manipulación. Sin embargo, el gasto relativo en instalaciones es menor comparado con la madera, debido a que las estructuras de hormigón ofrecen inherentemente mejores propiedades de aislamiento acústico y térmico, y una resistencia natural al fuego que reduce la necesidad de sistemas adicionales.

Ambos métodos, al ser industrializados, presentan ventajas significativas sobre los métodos tradicionales de construcción. La prefabricación de elementos en fábrica permite un control de calidad más riguroso y una reducción de desperdicios en obra, lo que se traduce en una construcción más limpia y eficiente. Además, la rapidez en el montaje de ambos sistemas reduce los tiempos de construcción, lo que puede llevar a una disminución de los costos indirectos asociados a la obra.

Es así que, mientras que la madera ofrece una opción competitiva en términos de costos y tiempos, especialmente para proyectos donde la ligereza y la rapidez son prioritarias, el hormigón prefabricado sigue siendo una opción robusta para proyectos que requieren una durabilidad y resistencia estructural superior. La elección entre uno y otro material dependerá

por lo tanto del análisis de costos total, las necesidades específicas del proyecto y los criterios de diseño sustentable y eficiencia energética que se deseen cumplir.

SOLO USO ACADÉMICO

4.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en la vivienda social chilena en madera y concreto

El desarrollo sostenible en la construcción de viviendas sociales en Chile requiere de un enfoque integral que considere no solo los aspectos económicos y sociales, sino también los ambientales. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) proporciona una metodología robusta para evaluar estos impactos ambientales a lo largo de todas las etapas de la vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este ensayo compara dos de los materiales más comúnmente utilizados en la construcción de viviendas sociales en Chile: la madera y el cemento en prefabricados, destacando sus respectivos impactos ambientales y proponiendo un camino hacia la sostenibilidad.

El ACV es una técnica para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de un producto a lo largo de su vida. En el contexto de la vivienda social, el ACV permite analizar comparativamente las implicaciones de construir con madera versus cemento, considerando indicadores como la emisión de gases de efecto invernadero, el consumo de energía y agua, y la generación de residuos.

Elaborar un inventario de ciclo de vida -ICV- implica en este sentido, la recopilación de datos sobre todos los insumos y salidas en cada etapa del ciclo de vida del producto. Para las viviendas de madera, los insumos incluyen la tala, el procesamiento de la madera y el transporte. En el caso del concreto, se considera la extracción de materiales como arena y grava, la producción de cemento, y su transporte al sitio de construcción. Ambos materiales requieren energía para la construcción y tienen diferentes necesidades de mantenimiento y durabilidad a lo largo de su vida útil.

Para una comparación detallada entre una vivienda básica de madera prefabricada y una de prefabricados de cemento, es importante considerar una variedad de materiales que se usan comúnmente en cada tipo de construcción (Tabla 22).

Tabla 22: Materiales principales utilizados en cada tipo de construcción

Categoría	Vivienda de Madera Prefabricada	Vivienda de Prefabricados de Cemento
Estructura Principal	Madera (pilares, vigas, paneles)	Cemento prefabricado, bloques de hormigón
Aislamiento	Fibra de madera, lana mineral	Poliestireno expandido, paneles aislantes de hormigón
Cubierta Exterior	Paneles de madera, revestimiento vinílico	Paneles de hormigón, revestimiento de fibrocemento
Cubierta Interior	Paneles de madera contrachapada, yeso	Paneles de yeso, bloques de hormigón
Fundación	Bloques de hormigón, pilotes de madera	Losa de hormigón armado
Techumbre	Tejas asfálticas, tejas de madera	Tejas de hormigón, tejas asfálticas
Ventanas	Marcos de madera o PVC	Marcos de aluminio o PVC
Puertas	Madera, PVC	Metal, PVC

Instalaciones	Tuberías de PVC, cableado estándar	Tuberías de PVC, cableado estándar
Acabados Exteriores	Pintura a base de agua, barniz	Pintura acrílica, revestimientos impermeabilizantes
Acabados Interiores	Pintura a base de agua, papel tapiz	Pintura acrílica, azulejos cerámicos
Pisos	Madera laminada, vinilo	Cerámica, hormigón pulido

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla ofrece una visión general de los materiales utilizados en cada tipo de vivienda, lo que permite una comparación directa de los componentes de construcción. Cada elección material tiene implicaciones en términos de costos, durabilidad, impacto ambiental y mantenimiento, elementos clave a considerar en el diseño y planificación de proyectos de vivienda social.

La elección de tecnologías empleadas en la construcción es también fundamental, especialmente cuando se comparan estructuras de madera prefabricada con aquellas de cemento prefabricado. La tabla 23 presenta las tecnologías clave que generalmente se consideran para cada tipo de construcción.

Tabla 23: Tecnologías implementadas en cada tipo de construcción

Tecnología	Vivienda de Madera Prefabricada	Vivienda de Prefabricados de Cemento
Prefabricación	Producción de paneles y elementos estructurales en fábrica	Fabricación de módulos de hormigón en planta, transporte al sitio
Montaje en sitio	Ensamble rápido de componentes prefabricados	Instalación de paneles de hormigón, requiere grúas y equipo pesado
Sistemas de aislamiento	Instalación de aislamiento integrado en paneles o aplicado in situ	A menudo incorporado dentro de los paneles de hormigón como capas
Sistemas de techo	Techos ligeros que pueden incluir sistemas de tejas o metal liviano	Estructuras de techos más pesadas, a menudo con tejas de hormigón
Fundaciones	Pilotes de madera o bloques de hormigón	Fundaciones de losa de hormigón armado, más robustas
Instalaciones eléctricas y plomería	Sistemas modulares que se integran fácilmente dentro de paneles	Instalación antes del montaje de paneles o cortado para integración
Eficiencia energética	Diseño orientado a la eficiencia con posibilidad de integrar tecnologías pasivas	Requiere diseño cuidadoso para evitar puentes térmicos
Sistemas de ventilación	Fácil integración de sistemas de ventilación mecánica o natural	Necesita planificación específica para sistemas de ventilación
Control de calidad	Mayormente controlado en fábrica antes del envío	Control de calidad tanto en planta como en sitio

Adaptabilidad y modificaciones
Tecnologías sostenibles

Más fácil de modificar y adaptar post- instalación	Modificaciones más desafiantes y costosas una vez instalado
Integración de techos verdes, recolección de agua de lluvia	Opciones de paredes verdes, sistemas de recolección de aguas grises

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla destaca por lo tanto, cómo cada tipo de vivienda utiliza tecnologías que pueden influir en la rapidez de construcción, la eficiencia energética, la durabilidad y la sostenibilidad. Las viviendas de madera prefabricada tienden a ser más rápidas de ensamblar y pueden ser más flexibles en cuanto a modificaciones y eficiencia energética debido a su ligereza y aislamiento integrado. Por otro lado, las viviendas de cemento prefabricado ofrecen robustez y durabilidad pero pueden requerir más recursos durante la construcción, tanto en términos de mano de obra como de maquinaria pesada.

La madera, como recurso renovable, generalmente tiene una huella de carbono relativamente baja ya que actúa como un sumidero de carbono, almacenando CO₂ durante su crecimiento. Las tecnologías de prefabricación en madera también reducen el desperdicio en el sitio de construcción, lo que contribuye a una menor emisión de carbono durante la construcción. La producción de cemento es en cambio intensiva en carbono, especialmente durante la calcinación del clínker. Sin embargo, la tecnología de prefabricación puede ayudar a reducir las emisiones indirectas al minimizar el desperdicio y optimizar los recursos en el sitio de construcción.

En material de consumo energético, este es generalmente menor en la producción de madera comparado con el cemento, especialmente si se considera el ciclo de vida completo, incluyendo la fase de operación donde las propiedades aislantes de la madera pueden reducir el consumo energético para calefacción y refrigeración ya que el cemento requiere una cantidad significativa de energía durante su producción, aunque la prefabricación puede reducir la energía total consumida por medio de una construcción más eficiente.

Respecto al uso del agua, generalmente, la producción de madera requiere menos agua que la producción de cemento. Además, las técnicas de construcción con madera pueden no requerir tanta agua en el sitio de construcción. La producción de cemento y hormigón es en cambio intensiva en el uso de agua, especialmente durante el mezclado y curado del hormigón.

Respecto de la generación de residuos, la prefabricación de madera tiende a generar menos residuos en el sitio de construcción debido a que los componentes vienen pre-medidos y cortados. Aunque la prefabricación de cemento también reduce los residuos en el sitio, la naturaleza del material puede generar más escombros durante la demolición que la madera.

Respecto al potencial de Acidificación y Eutrofización, en ambos tipos de materiales y tecnologías, estos impactos dependen en gran medida de las emisiones durante la producción de materiales. El cemento, debido a las emisiones de los procesos industriales, puede tener un mayor potencial de acidificación y eutrofización comparado con la madera. Si se habla igualmente de toxicidad potencial, si se utiliza madera tratada o se aplican conservantes, puede haber preocupaciones de toxicidad, aunque generalmente es menos problemático en

comparación con los procesos industriales del cemento que pueden involucrar sustancias químicas que contribuyen a la toxicidad ambiental.

Finalmente, respecto del agotamiento de recursos no renovables, la madera es en general un recurso renovable, con relación al cemento que depende de recursos no renovables como la piedra caliza y otros agregados minerales.

En materia de normativas que recojan estas preocupaciones ambientales, para Garay Moena & Benedetti Ruiz (2024), una proporción significativa de las empresas constructoras de viviendas prefabricadas en madera cumplen en la Región Central de Chile con las regulaciones vigentes, sin embargo, es importante decir también que persisten debilidades en la información técnica proporcionada a los clientes y en el cumplimiento normativo, lo que sugiere la necesidad de fortalecer los mecanismos de regulación y control para asegurar que todas las viviendas cumplan con los estándares de habitabilidad y seguridad, especialmente en contextos de autoconstrucción donde la inseguridad territorial podría ser una preocupación.

Dichas autoras identifican además a la sustentabilidad como el atributo menos enfatizado por las empresas, con poca información proporcionada sobre la huella de carbono y otras métricas ambientales. Este hallazgo es crucial para el ACV, ya que la adopción de prácticas sostenibles en la construcción no solo reduce el impacto ambiental sino que también puede influir en la percepción de los consumidores y en la diferenciación en el mercado, en este sentido, aun así, existe sin lugar a duda un potencial significativo para industrializar el sector de viviendas prefabricadas en madera, lo que podría mejorar la eficiencia de la producción y la implementación de prácticas sostenibles. Este punto es vital para el ACV, pues la industrialización puede llevar a una reducción de residuos y una mejor gestión de recursos, elementos clave en la evaluación del impacto ambiental.

En tanto es muy amplia la variedad en la complejidad de los proyectos que manejan las empresas, desde proyectos de baja complejidad hasta aquellos de alta complejidad, esto llega a tener implicaciones directas para el ACV, ya que proyectos más complejos pueden requerir un análisis más detallado de los insumos y procesos involucrados, afectando así los resultados del ACV en términos de eficiencia energética y uso de materiales (Garay Moena & Benedetti Ruiz, 2024).

Se puede entonces argumentar cómo, no obstante los esfuerzos gubernamentales por promocionar la elección de prefabricados de madera en proyectos de vivienda social, la falta de cumplimiento normativo y la limitada atención a la sustentabilidad de las empresas constructoras podrían afectar negativamente los esfuerzos para mitigar el impacto ambiental de la construcción de viviendas.

El concreto en cambio, tiene una alta energía incorporada, principalmente debido a la producción de cemento, que es intensiva en carbono. Sin embargo, ofrece ventajas en términos de durabilidad y resistencia a desastres naturales, como terremotos, que son prevalentes en Chile. El reciclaje de concreto es posible, aunque menos eficiente que el de la madera.

Aliaga Villarroel (2022) ha realizado un estudio exhaustivo sobre la durabilidad y resistencia al fuego de ambos materiales, lo cual es crucial para el ACV dado que estos factores influyen

en la vida útil del edificio y en la seguridad de los ocupantes. La autora detalla cómo la madera, cuando es tratada y utilizada correctamente, puede ofrecer una resistencia comparable al hormigón en términos de durabilidad y seguridad contra incendios, aunque el hormigón sigue teniendo una ventaja en cuanto a la resistencia inherente al fuego.

Al analizar los métodos constructivos de ambos materiales, proporcionando datos sobre la eficiencia y rapidez en la construcción, Aliaga Villaroel (2022) concluye que, en términos de emisiones de CO₂ durante la fase de construcción, la madera, por ser más ligera y fácil de manejar, puede ofrecer ventajas en términos de reducción de tiempo y costos de construcción, además de menor energía consumida durante estas etapas.

La madera presenta entonces, un bajo impacto ambiental en comparación con el hormigón prefabricado, especialmente en términos de emisiones de CO₂ y esto es un factor que permite cuantificar y comparar los beneficios de reducir la huella de carbono a través del uso de materiales más sostenibles. La interpretación del ACV indica que mientras los componentes de la vivienda de madera podrían ser más sostenibles desde la perspectiva del cambio climático y la eficiencia energética, los componentes de la vivienda de concreto ofrecen en cambio ventajas en términos de resiliencia y longevidad que maximizan la sostenibilidad (Tabla 24)

Tabla 24: Ventajas de las viviendas de concreto prefabricado

Gestión Sostenible de Bosques: <ul style="list-style-type: none">• Asegurar que la madera proviene de bosques gestionados de forma sostenible.
Innovación en Concreto: <ul style="list-style-type: none">• Desarrollar mezclas de concreto con materiales reciclados o alternativos para reducir su huella de carbono.
Políticas Integradas: <ul style="list-style-type: none">• Fomentar políticas que integren criterios de sostenibilidad en la planificación y construcción de viviendas sociales.

Fuente: Aliaga Villaroel (2022)

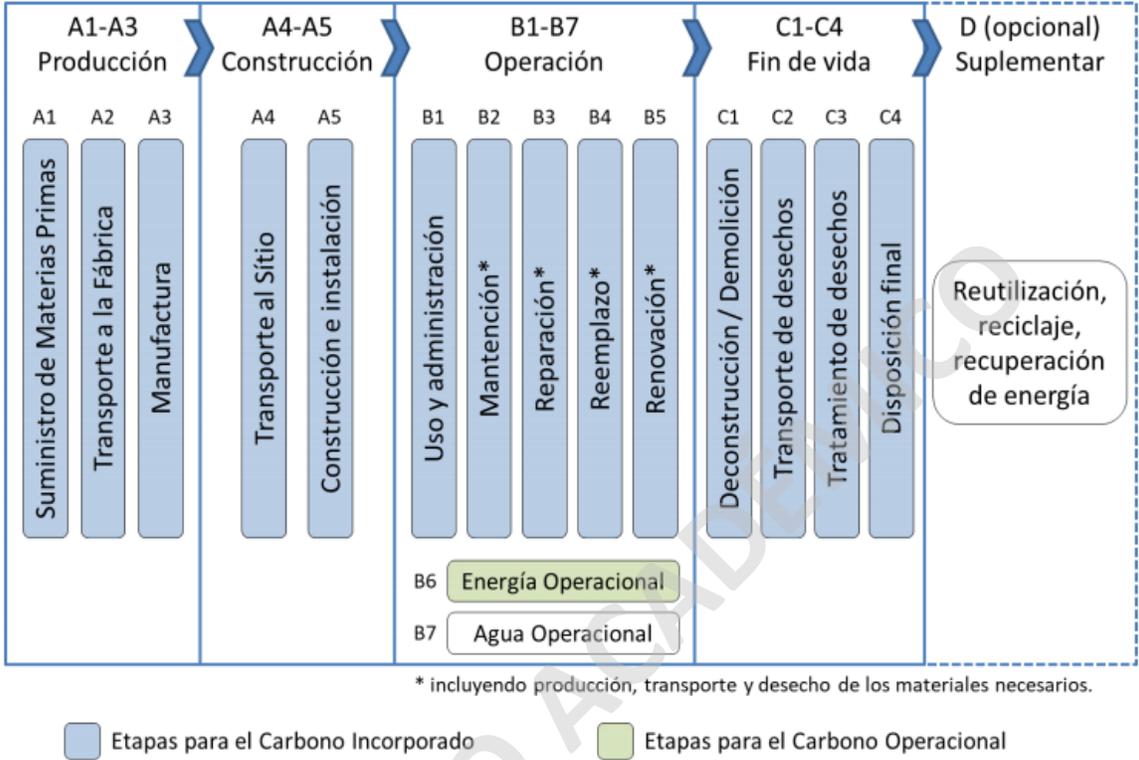
El análisis del ciclo de vida de las viviendas sociales construidas con madera y concreto en Chile revela entonces un complejo balance entre impactos ambientales, económicos y sociales. Una estrategia de construcción que combine las ventajas de ambos materiales podría ofrecer una solución óptima, alineada con los principios de desarrollo sostenible. Es imperativo por eso que los planificadores urbanos, constructores y políticos consideren estos factores para mejorar la sostenibilidad de las viviendas sociales en Chile, contribuyendo así a una mejor calidad de vida para sus habitantes y a la protección del medio ambiente.

Siguiendo las normativas internacionales ISO 21930¹³ y EN 15978, que estandarizan las fases y actividades involucradas en el ciclo de vida de la construcción a continuación se va a

¹³ La ISO 21930 se centra específicamente en la industria de la construcción. Proporciona principios, requisitos y directrices para la evaluación del impacto ambiental de los productos de construcción, incluyendo los métodos para la elaboración de declaraciones ambientales de producto (DAP). Esta norma está diseñada para apoyar el

describir y ampliar cada etapa del proceso, en el contexto chileno, donde factores como la extracción de recursos, la energía operacional, y la gestión de residuos tienen particularidades específicas debido a las regulaciones, el clima, y la economía local.

Figura 18: Etapas del ciclo de vida de la construcción según modelo propuesto por la ISO 21930



Fuente: (Wiche Latorre, Rodríguez Droguett, & Bianchi Granato, 2020)

Tabla 25: Etapas del ciclo de vida de la construcción según modelo propuesto por la ISO 21930

desarrollo de prácticas más sostenibles en la construcción y facilitar la comparación objetiva del impacto ambiental de los productos de construcción a través de la estandarización de cómo se reportan estos impactos.

Producción

- *Suministro de Materias Primas (A1-A3):*
 - En Chile, la extracción de materias primas involucra a menudo áridos y otros recursos no renovables esenciales para la fabricación de hormigón y acero. La minería y la extracción de madera de bosques gestionados de manera sostenible son cruciales. El impacto ambiental de estas actividades está regulado, aunque la vigilancia y la implementación efectiva de prácticas sostenibles son desafíos constantes.
- *Transporte a la Fábrica (A4):*
 - El transporte en Chile, debido a su geografía extensa y diversa, puede significar largos trayectos desde lugares de extracción hasta las plantas de procesamiento, aumentando el carbono incorporado debido al uso intensivo de combustibles fósiles.
- *Manufactura (A5):*
 - La fabricación de materiales de construcción como el cemento y el acero es energéticamente intensiva. En Chile, se están haciendo esfuerzos para integrar tecnologías más limpias y eficientes en este sector para reducir las emisiones de CO₂.

Construcción y Uso

- *Construcción In Sitio (A5):*
 - La fase de construcción incluye no solo la edificación sino también el uso de maquinaria pesada que a menudo funciona con diesel, contribuyendo a la huella de carbono del proyecto.
- *Operación (B1-B7):*
 - *Uso y Administración (B1):* Incluye la gestión diaria del edificio, donde la eficiencia energética puede variar ampliamente dependiendo de la calidad de la construcción y de los sistemas instalados.
 - *Mantenimiento (B2) y Reparación/Reemplazo (B3-B4):* Debido al clima variado de Chile, desde desiertos áridos hasta climas fríos y húmedos en el sur, el mantenimiento puede ser más frecuente y costoso.
 - *Energía Operacional (B6):* La energía utilizada para calefacción, refrigeración, iluminación y otros servicios es significativa, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas como Santiago.
 - *Agua Operacional (B7):* La gestión del agua es crítica en Chile, particularmente en áreas propensas a sequías donde el agua es un recurso escaso.

Fin de Vida

- *Deconstrucción/Demolición (C1-C2):*
 - La demolición de edificios en Chile debe considerar el reciclaje de materiales y la minimización de residuos enviados a vertederos. La legislación está evolucionando para promover la deconstrucción como alternativa a la demolición completa para permitir la reutilización de materiales.
- *Tratamiento de Desechos (C3):*
 - Involucra el procesamiento de materiales reciclables y no reciclables, con esfuerzos crecientes hacia la minimización de residuos en vertederos y la maximización de la recuperación de recursos.

Suplementar (Opcional)

- *Reutilización, Reciclaje, Recuperación de Energía (D):*
 - Estas actividades son opcionales pero críticas para alcanzar la sostenibilidad en el sector de la construcción. Incluyen la reutilización de componentes estructurales, el reciclaje de materiales como el concreto y la madera, y la recuperación de energía de los desechos no reciclables.

Fuente: (Wiche Latorre, Rodríguez Droguett, & Bianchi Granato, 2020)

Según Wiche Latorre, et al., (2020), estimar hoy la huella de carbono en el ciclo de vida de una edificación en Chile es un proceso complejo que requiere datos de múltiples fuentes y no siempre está al alcance de todos los profesionales del sector de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción, debido a limitaciones de conocimiento, tiempo y recursos económicos. Para facilitar este proceso, es esencial contar con herramientas simplificadas como calculadoras de huella de carbono que sean fáciles de usar y rápidas de implementar, diseñadas para ser operadas incluso sin un conocimiento avanzado en ACV. Estas herramientas, centradas principalmente en la etapa de diseño del edificio, permiten hacer modificaciones significativas a bajo costo.

Por otro lado, en Chile, el uso de modelos de demanda energética es común y proporciona datos cruciales para calcular el carbono operacional de las edificaciones. La integración efectiva de estas calculadoras en los flujos de trabajo existentes es crucial y se facilita mediante el uso de tecnologías como BIM y estándares informáticos comunes. Sin embargo, la recopilación de datos para un ACV completo enfrenta desafíos debido a la desconexión entre los diversos actores involucrados, como arquitectos, constructoras, inmobiliarias y residentes, quienes poseen información crítica pero fragmentada.

La disponibilidad de datos nacionales es por lo tanto limitada, ya que pocas empresas chilenas de materiales de construcción han desarrollado declaraciones de huella de carbono o ambientales para sus productos. Esto lleva a la dependencia de bases de datos internacionales que, aunque útiles, no reflejan precisamente el contexto local. Además, la logística de materiales en Chile necesita modernización para incluir trazabilidad del transporte, un aspecto crucial para obtener una imagen completa de la huella de carbono de las edificaciones en un país con una geografía tan extensa y con centros de producción concentrados (Wiche Latorre, et al., 2020).

En el contexto de la construcción en Chile, la sostenibilidad debe verse como un marco integral que abarca no solo aspectos económicos y operativos, sino también el impacto ambiental y el desarrollo social. Su implementación exitosa depende de cuán bien las empresas comprendan y anticipen la integración de estas dimensiones. Esto es crucial debido a que la construcción impacta significativamente el medio ambiente y las comunidades locales, afectando directamente a más de 728,000 empleados anualmente en el país (Cámara Chilena de la Construcción, 2020).

En términos prácticos, la sostenibilidad en la construcción se manifiesta desde la fase de diseño, donde se pueden realizar cambios significativos de manera coste-eficiente. Herramientas como las calculadoras de huella de carbono simplificadas permiten a los profesionales evaluar y reducir el impacto ambiental desde etapas tempranas. La generación de residuos, particularmente en la construcción y demolición, es notable; en Chile, las construcciones generan más escombros que en países con prácticas más sostenibles (Cámara Chilena de la Construcción, 2020).

El uso de materiales innovadores y técnicas de construcción, como la madera contralaminada y el uso de áridos reciclados, no solo reducen el impacto ambiental sino que también mejoran la productividad y reducen los costos. Sin embargo, la adopción de estas prácticas enfrenta desafíos debido a normativas rígidas y falta de infraestructura adecuada para el reciclaje y la gestión de residuos (Cámara Chilena de la Construcción, 2020).

4.4. Recomendaciones para el Desempeño Ambiental de la vivienda social chilena en madera y concreto

En Chile, aproximadamente el 86% de las viviendas existentes se construyeron antes de la implementación de la reglamentación térmica en el año 2000, lo que ha originado una distribución del territorio en siete zonas térmicas, desde Z1 hasta Z7, basadas en la medida de los Grados-Día de calefacción anuales, donde Z1 tiene los menores y Z7 los mayores valores. Esto implica que muchas de estas viviendas, especialmente las de familias de bajos ingresos y en condiciones vulnerables, carecen de aislación adecuada, lo que resulta en altos consumos energéticos y emisiones de CO₂. Estas viviendas, que varían en tamaño y que raramente se refrigeran en verano, son frecuentemente calentadas en invierno, a pesar de ser ocupadas por los sectores más desfavorecidos. En respuesta, las políticas energéticas actuales en Chile apuntan a que para 2050, la mayoría de la generación eléctrica provenga de fuentes renovables y todas las nuevas construcciones cumplan con altos estándares de eficiencia energética (Hernández López, et al., 2019).

Por otro lado, Chile, siendo uno de los principales productores de madera, muestra una baja prevalencia de uso de este material en la construcción de viviendas, especialmente en las zonas más pobladas, prefiriéndose la albañilería. Sin embargo, en viviendas sociales, la madera se usa principalmente en las estructuras de techumbre y en las zonas menos pobladas para las paredes. Los estudios revisados en esta investigación indicaron que las viviendas sociales en Chile generalmente no cumplen con los estándares de confort y eficiencia energética adecuados, destacándose la albañilería en zonas de alta vulnerabilidad por su menor resistencia térmica comparada con muros de madera. Esto plantea la necesidad de evaluar los beneficios del uso de la madera en términos de confort y sostenibilidad ambiental, especialmente en las zonas donde su uso no es predominante.

En el contexto chileno, la madera se posiciona hoy como un material preferente para la construcción sostenible, no solo por su capacidad para secuestrar carbono sino también por su menor impacto ambiental durante la producción comparado con alternativas como el concreto. El apoyo a políticas que promuevan la gestión sostenible de bosques y la certificación de la madera es fundamental para garantizar la sostenibilidad de su uso. Adicionalmente, el concreto prefabricado se presenta como una opción viable para áreas donde la madera no es adecuada, debido a su robustez y la posibilidad de optimizar los procesos mediante la prefabricación, lo cual puede reducir los costos asociados al transporte y mejorar la eficiencia del uso de los materiales.

La eficiencia energética es otro pilar crítico en la construcción de viviendas sostenibles. Las viviendas construidas con madera, por ejemplo, deben aprovechar las propiedades aislantes naturales de este material para minimizar la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración artificiales, lo que a su vez reduce el consumo energético y mejora el confort térmico. Además, el diseño de todas las viviendas debe contemplar estrategias pasivas que optimicen la orientación del edificio y el uso de sistemas de sombreado natural para maximizar la eficiencia energética a lo largo de su vida útil.

La gestión de residuos y el reciclaje también juegan un papel crucial en la construcción sostenible. Es imprescindible que se implementen políticas que incentiven la reducción de

residuos en los sitios de construcción, especialmente a través del uso de materiales prefabricados y paneles de madera que facilitan la montaje y desmontaje sin generar excesivos residuos. Además, fomentar la investigación en tecnologías de reciclaje para materiales de construcción, particularmente para el concreto, puede contribuir a mejorar la sostenibilidad en las fases de demolición y disposición final.

La educación y capacitación son fundamentales para la adopción de prácticas de construcción sostenible. Desarrollar programas de capacitación para los trabajadores del sector que abarquen técnicas avanzadas, incluyendo la instalación y mantenimiento de estructuras de madera y concreto prefabricado, puede elevar los estándares de la industria. Igualmente importante es educar a los profesionales del sector y al público general sobre los beneficios ambientales y de rendimiento de los sistemas constructivos sostenibles, para fomentar su aceptación y adopción.

Por último, la innovación en los materiales de construcción y los métodos constructivos debe ser una prioridad. Apoyar la innovación y fomentar las asociaciones entre universidades, centros de investigación y la industria de la construcción permitirá el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales que puedan ser aplicados eficazmente en el contexto chileno. Estas innovaciones pueden jugar un papel decisivo en la reducción de la huella de carbono y la mejora de la eficiencia energética de las viviendas, alineando a Chile con los objetivos globales de desarrollo sostenible y reducción de impactos ambientales.

4.5. Propuesta de zonificación en función a criterios de eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental para la zona centro-sur de Chile

El propósito de este capítulo es desarrollar una propuesta de zonificación para la implementación de los sistemas constructivos de paneles de madera y de prefabricación de hormigón en la zona centro-sur de Chile la cual debe estar fundamentada en los criterios de eficiencia constructiva, costos y sostenibilidad ambiental evaluados en los capítulos anteriores, con el fin de identificar las áreas donde cada sistema puede ofrecer mayores beneficios. La zonificación propuesta busca optimizar la construcción de viviendas unifamiliares de interés social, respondiendo tanto a las condiciones geográficas y socioeconómicas locales como a las exigencias de sostenibilidad y eficiencia que promueven un desarrollo urbano más equilibrado y ambientalmente responsable.

En la medida que la zonificación es un componente clave en la optimización de la construcción de viviendas unifamiliares de interés social es importante reconocer que esta va a permitir identificar de manera precisa las áreas geográficas más adecuadas para la implementación de distintos sistemas constructivos en función de criterios técnicos, económicos y ambientales. En este sentido, una zonificación adecuada debe facilitar una planificación eficiente, permitiendo que se maximicen los beneficios de cada sistema de construcción, como los paneles de madera o la prefabricación de hormigón, de acuerdo con las características particulares de cada región.

La correcta identificación de áreas para la implementación de cada sistema constructivo tiene en todo caso, un impacto directo en la eficiencia constructiva. Por ejemplo, en zonas rurales con acceso a recursos forestales y con menores exigencias en términos de construcción en altura, el uso de paneles de madera puede reducir significativamente los

tiempos de construcción y generar beneficios ambientales al utilizar materiales locales con baja huella de carbono. En contraste, en áreas urbanas de alta densidad poblacional, donde se requieren edificaciones más resistentes y duraderas, el uso de prefabricación de hormigón puede garantizar una mayor resistencia estructural y durabilidad, minimizando costos de mantenimiento a largo plazo.

Además, la zonificación por sí misma, como herramienta de planificación, permite asignar recursos de manera más eficiente, optimizando los costos tanto de materiales como de transporte y logística. Identificar áreas donde los sistemas constructivos puedan ser implementados con menores costos iniciales o de transporte contribuye así a un uso más racional de los recursos económicos de proyectos de interés social donde la rentabilidad y la sostenibilidad financiera son esenciales.

Finalmente, desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental, la zonificación también desempeña un papel crucial al asegurar que los materiales constructivos seleccionados no solo sean los más eficientes y económicos sino también los que generen el menor impacto ambiental posible de manera que una propuesta bien pensada pueda contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a una menor utilización de recursos no renovables.

Para desarrollar la zonificación propuesta a continuación se hará uso de criterios basados en los análisis realizados en los capítulos previos, los cuales se enfocan en aspectos esenciales de la construcción, tales como la eficiencia, los costos y la sostenibilidad, en función de las características geográficas, económicas y ambientales de la zona centro-sur de Chile (Tabla 26).

Tabla 26: Criterios a considerar en la zonificación propuesta

Eficiencia constructiva

- **Tiempo de construcción:** Los paneles de madera, al ser prefabricados y ligeros, permiten una construcción más rápida en comparación con el hormigón prefabricado. Por lo tanto, en áreas donde se requiere una entrega rápida de viviendas, como en comunidades rurales o con limitaciones de infraestructura, el sistema de paneles de madera resulta más eficiente.
- **Disponibilidad de mano de obra:** La construcción con paneles de madera, que requiere menos mano de obra especializada y menos operaciones en el sitio, es más eficiente en zonas donde la mano de obra capacitada es escasa. Por otro lado, en áreas urbanas, donde es más probable encontrar trabajadores calificados para el uso del hormigón prefabricado, este sistema puede ser más adecuado.

Costos de construcción

- **Costos iniciales:** Los paneles de madera suelen presentar un costo inicial más alto debido a la prefabricación y el transporte, especialmente en áreas alejadas de los centros de producción. En cambio, el hormigón prefabricado puede ser más rentable en zonas cercanas a las plantas de producción, donde los costos de transporte son menores.
- **Costos de mantenimiento:** El hormigón prefabricado, aunque puede tener un costo inicial moderado, ofrece mayor durabilidad y menores necesidades de mantenimiento, lo que lo hace ideal para zonas urbanas con condiciones climáticas adversas o alta actividad sísmica. En cambio, las viviendas construidas con paneles de madera, si bien ofrecen beneficios de sostenibilidad, pueden requerir más mantenimiento, especialmente en regiones con alta humedad.

Sostenibilidad ambiental

- **Impacto ambiental:** Los paneles de madera, al ser un recurso renovable, presentan ventajas significativas en la reducción de la huella de carbono durante su fabricación y uso. Este sistema es más adecuado en áreas donde la sostenibilidad es prioritaria, especialmente en regiones con abundancia de recursos forestales y un menor acceso a recursos de energía fósil. En contraste, el hormigón prefabricado, si bien tiene un mayor impacto ambiental durante su producción, resulta más adecuado en áreas urbanas donde se requiere mayor resistencia a desastres naturales y durabilidad.
- **Uso de recursos locales:** En áreas ricas en recursos forestales, el uso de paneles de madera no solo es más sostenible, sino también más eficiente desde el punto de vista logístico. En cambio, en zonas con fácil acceso a plantas de producción de hormigón y donde el transporte de madera podría ser costoso o logísticamente complejo, se prioriza la prefabricación de hormigón.
- **Huella de carbono:** Los paneles de madera, debido a su capacidad para almacenar carbono, ofrecen una ventaja significativa en la reducción de emisiones. Sin embargo, en zonas con mayor riesgo sísmico o condiciones climáticas extremas, la mayor durabilidad y resistencia del hormigón prefabricado pueden justificar su mayor huella de carbono inicial, al ofrecer una solución más sostenible a largo plazo.

Fuente: Elaboración propia

4.5.1. Características geográficas y climáticas de la Zona Centro-Sur de Chile

La zona centro-sur de Chile, delimitada a las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía, presenta una diversidad significativa en términos de clima, geografía y factores socioeconómicos que influyen directamente en la construcción y el desarrollo de viviendas de interés social. A continuación se describen las características clave de cada una de estas regiones:

1. Región del Maule (VII Región)

- **Clima:** Predomina un clima mediterráneo, con veranos cálidos y secos, e inviernos fríos y lluviosos. Hacia la cordillera, el clima se vuelve más húmedo y frío, lo que influye en la elección de los materiales constructivos para enfrentar las bajas temperaturas y las precipitaciones.
- **Geografía:** La región está compuesta por valles fértiles y cordilleras, lo que facilita el acceso a recursos agrícolas y forestales. En las zonas más cercanas a la

cordillera, la actividad sísmica es una preocupación importante, lo que favorece el uso de sistemas constructivos resistentes, como el hormigón prefabricado.

- **Aspectos socioeconómicos:** La actividad económica se basa principalmente en la agricultura, lo que genera una mayor demanda de viviendas rurales de bajo costo. La mano de obra local es predominantemente agrícola, con menos disponibilidad de trabajadores calificados para la construcción avanzada, lo que favorece la implementación de sistemas constructivos que no requieran alta especialización.

2. Región de Ñuble (XVI Región)

- **Clima:** Similar al de la región del Maule, el clima en Ñuble es mediterráneo, con precipitaciones más concentradas en el invierno. La variación climática entre las zonas costeras y las zonas montañosas afecta la elección de los materiales constructivos, requiriendo mayor aislamiento térmico en las zonas más frías.
- **Geografía:** Ñuble combina áreas agrícolas y cordilleras, con terrenos fértiles en el valle central y zonas montañosas en el este. Estas características geográficas son determinantes para la selección de sistemas constructivos; las áreas rurales podrían beneficiarse del uso de paneles de madera, mientras que las zonas cercanas a la cordillera requieren construcciones más resistentes a los movimientos sísmicos.
- **Aspectos socioeconómicos:** La región tiene una economía principalmente agrícola y forestal, lo que facilita el acceso a recursos madereros. Esto hace que el uso de paneles de madera sea una opción económica y sostenible, especialmente en áreas rurales. Sin embargo, la disponibilidad de mano de obra especializada sigue siendo un reto.

3. Región del Biobío (VIII Región)

- **Clima:** El Biobío presenta un clima más templado, con precipitaciones importantes durante todo el año, especialmente en las zonas costeras. La costa está expuesta a vientos fuertes y humedad, lo que requiere materiales de construcción resistentes a la corrosión y al deterioro, como el hormigón prefabricado.
- **Geografía:** La región combina áreas altamente urbanizadas, como Concepción, con zonas rurales y forestales. La presencia de grandes centros urbanos y una economía industrial avanzada favorece el uso de tecnologías constructivas más complejas y el acceso a materiales prefabricados, especialmente en áreas urbanas y periurbanas.
- **Aspectos socioeconómicos:** Es una de las regiones más industrializadas del país, con un importante sector de la construcción y el acceso a plantas de prefabricación de hormigón. La disponibilidad de mano de obra calificada es mayor en comparación con otras regiones de la zona centro-sur, lo que permite la implementación de sistemas constructivos más avanzados, como el hormigón prefabricado en las áreas urbanas.

4. Región de La Araucanía (IX Región)

- **Clima:** El clima en La Araucanía es más húmedo y frío, con inviernos largos y lluviosos. En las zonas de mayor altitud, las temperaturas pueden ser muy bajas, lo que requiere sistemas constructivos con buen aislamiento térmico. El uso de materiales sostenibles, como la madera, puede ser una solución eficiente para mitigar el impacto climático.
- **Geografía:** La región es predominantemente montañosa y forestal, con una gran cantidad de recursos madereros, lo que hace de los paneles de madera una opción accesible y económicamente viable. Sin embargo, en las zonas con mayor riesgo sísmico, como las áreas cercanas a la cordillera, es preferible el uso de sistemas más resistentes, como el hormigón prefabricado.
- **Aspectos socioeconómicos:** La economía de la región se basa principalmente en la agricultura y la explotación forestal. Esto favorece el acceso a recursos madereros locales, lo que reduce los costos de transporte y hace que la construcción con paneles de madera sea altamente eficiente, especialmente en áreas rurales. Sin embargo, las áreas urbanas, como Temuco, podrían beneficiarse del uso de hormigón prefabricado debido a la necesidad de infraestructura más duradera y resistente.

Las variaciones en el clima, la geografía y los factores socioeconómicos entre estas cuatro regiones justifican la necesidad de una zonificación diferenciada para la implementación de los sistemas constructivos y en este sentido:

- **Áreas rurales con acceso a recursos madereros**, como en La Araucanía y Ñuble, son idóneas para el uso de paneles de madera debido a la sostenibilidad y accesibilidad de este recurso.
- **Áreas urbanas o cercanas a zonas sísmicas**, como en Biobío y las zonas montañosas del Maule, requieren construcciones más robustas y resistentes, lo que justifica el uso de hormigón prefabricado.
- **Condiciones climáticas extremas**, como las presentes en La Araucanía, requieren construcciones con buen aislamiento térmico, donde los paneles de madera también pueden ser una opción eficiente si se manejan correctamente los riesgos asociados a la humedad.

4.5.2. Distribución de los recursos materiales en la Zona Centro-Sur de Chile

La disponibilidad de recursos materiales clave es otro de los factores importantes que influye en la eficiencia y la viabilidad de los sistemas constructivos en las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía. A continuación, se detallan las características de acceso a materiales como la madera y el hormigón en estas regiones y cómo esto impacta la elección de los sistemas constructivos.

1. Región del Maule

- **Acceso a madera:** El Maule es una de las regiones con mayor producción forestal en Chile, especialmente de **pino radiata** y **eucalipto**, que son las principales

especies explotadas en la industria maderera. Este acceso directo a madera de alta calidad convierte a los **paneles de madera** en una opción viable y eficiente para la construcción de viviendas unifamiliares en zonas rurales y periurbanas, dado que reduce los costos de transporte y garantiza una cadena de suministro estable. Además, la existencia de empresas dedicadas al procesamiento de la madera y la producción de paneles laminados incrementa la eficiencia en la implementación de este sistema constructivo.

- **Plantas de hormigón:** El acceso a plantas de **producción de hormigón** es más limitado en las zonas rurales, aunque existen algunas plantas en las cercanías de los principales centros urbanos, como Talca y Curicó. Esto hace que el **hormigón prefabricado** sea una opción más adecuada para proyectos en áreas urbanas, donde la proximidad a las plantas reduce los costos logísticos y mejora la eficiencia en la construcción.

2. Región de Ñuble

- **Acceso a madera:** Ñuble es una región con una fuerte presencia del sector forestal, similar a la región del Maule. La abundancia de **recursos forestales** y la proximidad a empresas procesadoras de madera hacen que el uso de **paneles de madera** sea altamente eficiente, especialmente en áreas rurales. Esta región tiene una infraestructura forestal bien desarrollada que permite la extracción, procesamiento y transporte de la madera con costos relativamente bajos, lo que favorece este sistema constructivo.
- **Plantas de hormigón:** Ñuble cuenta con menos plantas de **prefabricación de hormigón**, lo que incrementa los costos de transporte y hace menos eficiente este sistema en zonas rurales o alejadas. Sin embargo, en áreas urbanas como Chillán, la presencia de algunas plantas de hormigón y la infraestructura vial mejor desarrollada favorecen la utilización de **hormigón prefabricado**, especialmente en construcciones de mayor envergadura.

3. Región del Biobío

- **Acceso a madera:** El Biobío es uno de los principales polos forestales de Chile, con una extensa cobertura de **bosques de pino radiata** y **eucalipto**. Esto convierte a la madera en un recurso abundante y fácilmente accesible para la industria de la construcción, particularmente en zonas rurales y áreas periurbanas. La proximidad a plantas de procesamiento de madera industrializada en ciudades como Concepción y Los Ángeles facilita el uso de **paneles de madera** en proyectos constructivos, no solo por el acceso al material, sino también por la existencia de una cadena productiva consolidada.
- **Plantas de hormigón:** El Biobío es una de las regiones más industrializadas del país, lo que incluye una significativa cantidad de **plantas de prefabricación de hormigón**. La alta densidad de estas plantas y la infraestructura logística avanzada permiten que el **hormigón prefabricado** sea una opción muy eficiente en la región, particularmente en las áreas urbanas de Concepción, Talcahuano y Los Ángeles, donde se requiere un sistema constructivo más resistente y duradero.

debido a la sismicidad de la región. Además, las distancias más cortas entre las plantas y los sitios de construcción reducen considerablemente los costos de transporte.

4. Región de La Araucanía

- **Acceso a madera:** La Araucanía es una de las regiones con mayor cobertura forestal, y cuenta con un acceso abundante a **recursos madereros**, particularmente **pino radiata** y **especies nativas**. Esta abundancia, junto con la industria maderera bien desarrollada, permite el uso eficiente de **paneles de madera**, especialmente en zonas rurales y periurbanas, donde el transporte es más sencillo y los costos más bajos. Sin embargo, el clima húmedo de la región puede requerir tratamientos adicionales para garantizar la durabilidad de la madera utilizada en la construcción.
- **Plantas de hormigón:** Aunque la industria del **hormigón** en La Araucanía no está tan desarrollada como en el Biobío, existen plantas de prefabricación de hormigón en la capital regional, Temuco, y en algunas áreas industriales cercanas. El **hormigón prefabricado** es una opción viable en las áreas urbanas y periurbanas cercanas a Temuco, pero en zonas más rurales, los costos de transporte y la dificultad logística pueden limitar su uso. No obstante, en áreas con mayor riesgo sísmico, el uso de hormigón sigue siendo importante por su durabilidad y resistencia a desastres naturales.

En todas las regiones estudiadas, la **madera** es en todo caso, un recurso clave debido a la extensa actividad forestal, especialmente en Biobío, Maule y La Araucanía. La proximidad a los recursos madereros y la infraestructura existente para el procesamiento de paneles laminados y otros productos de madera industrializada hacen que el **uso de paneles de madera** sea altamente eficiente en las áreas rurales y periurbanas de estas regiones, reduciendo significativamente los costos de transporte y asegurando un suministro sostenible de material.

El **hormigón prefabricado** es en cambio más eficiente en las áreas urbanas y periurbanas de las regiones de **Biobío y Maule**, donde existe una mayor densidad de plantas de producción y una infraestructura vial adecuada para su transporte. Sin embargo, en regiones más rurales, como Ñuble y La Araucanía, los altos costos de transporte y la menor disponibilidad de plantas de prefabricación hacen que este sistema sea menos eficiente. En estas regiones, el uso de hormigón es más limitado a proyectos urbanos y de mayor envergadura, donde la durabilidad y resistencia sísmica son esenciales.

4.5.3. Normativas locales de la Zona Centro-Sur de Chile

En Chile, las normativas y restricciones urbanísticas y ambientales son determinantes para la planificación y ejecución de proyectos de construcción, ya que influyen en la elección del sistema constructivo más adecuado según el contexto geográfico, social y ambiental de cada región. A continuación, se describen las principales normativas y restricciones que afectan la

decisión de aplicar un sistema constructivo específico en las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía.

1. Normativas Urbanísticas Generales

- **Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC):** Es la norma principal que regula el ordenamiento territorial y urbanístico en Chile. Establece los requisitos que deben cumplir los proyectos de edificación, tanto en áreas urbanas como rurales, y define las responsabilidades de los distintos actores en la planificación urbana. La LGUC es fundamental para asegurar que cualquier sistema constructivo utilizado cumpla con los criterios de **seguridad estructural, resistencia sísmica, y habitabilidad**.
 - En áreas urbanas, esta ley puede exigir el uso de **hormigón prefabricado** o materiales de alta resistencia en zonas con riesgo sísmico elevado, como en las regiones del Biobío y La Araucanía.
 - En áreas rurales, donde las construcciones pueden tener menores exigencias en altura o densidad, se permite un mayor uso de **materiales como la madera**, siempre que cumplan con las normas de seguridad y resistencia.
- **Plan Regulador Comunal (PRC):** Cada comuna tiene un Plan Regulador Comunal que establece el uso de suelo permitido, las zonas urbanizables, y las alturas máximas de edificación, entre otros aspectos. Los PRC también definen las áreas de conservación y las restricciones en torno a los recursos naturales.
 - En comunas rurales o periurbanas, como en Ñuble y La Araucanía, los PRC suelen favorecer proyectos que utilicen **materiales locales** y técnicas de construcción menos invasivas, promoviendo el uso de **paneles de madera**.
 - En las comunas con mayor densidad poblacional y actividad industrial, como Concepción o Talca, los PRC suelen restringir el uso de materiales combustibles como la madera en construcciones de altura, favoreciendo el uso de **hormigón prefabricado**.

2. Normativas Ambientales

- **Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente:** Esta ley establece los principios generales para la protección del medio ambiente en Chile y regula la relación entre los proyectos de construcción y su impacto ambiental. Los proyectos que puedan causar un impacto significativo en el entorno, como grandes urbanizaciones o edificaciones industriales, deben someterse a un **Estudio de Impacto Ambiental (EIA)** o a una **Declaración de Impacto Ambiental (DIA)**, dependiendo de su envergadura.
 - En regiones con alta sensibilidad ambiental, como **La Araucanía**, esta normativa puede restringir el uso de materiales que generen altos niveles de emisiones durante su producción (por ejemplo, hormigón)

y favorecer la utilización de materiales más sostenibles como la madera.

- Los proyectos de construcción en zonas cercanas a áreas protegidas o con alta biodiversidad también deben cumplir con restricciones adicionales en términos de gestión de residuos, uso de agua y materiales, lo que podría favorecer sistemas constructivos más sostenibles.
- **Normativa sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):** Chile ha adoptado compromisos en relación con la reducción de sus emisiones de carbono, lo que influye directamente en las políticas de construcción. Existen incentivos y normativas que promueven la **construcción sostenible** y el uso de materiales de bajo impacto ambiental, como los **paneles de madera**, debido a su menor huella de carbono comparado con el hormigón.

3. Normativas Específicas para la Construcción

- **Norma Chilena NCh433.Of1996 (Modificada 2009): Diseño sísmico de edificios:** Esta norma regula las exigencias de diseño estructural de las edificaciones para resistir movimientos sísmicos. En áreas de alta sismicidad, como las regiones del Biobío y La Araucanía, las construcciones deben cumplir con altos estándares de **resistencia estructural**, lo que favorece el uso de **hormigón prefabricado** en edificaciones de mayor envergadura.
 - En las construcciones de menor escala, como viviendas unifamiliares en zonas rurales, los **paneles de madera** pueden cumplir con las normativas sísmicas si se aplican técnicas adecuadas de anclaje y refuerzo estructural.
- **Norma Chilena NCh1971: Eficiencia Energética en Edificios:** Esta normativa establece los requisitos de eficiencia energética para nuevas construcciones. Define las especificaciones para aislamiento térmico, eficiencia de sistemas de calefacción y ventilación, y el uso de energías renovables. En regiones con climas más fríos, como Ñuble y La Araucanía, las construcciones deben cumplir con estándares de aislamiento que pueden influir en la elección de materiales.
 - En estas regiones, el uso de **paneles de madera** puede ofrecer ventajas debido a sus propiedades térmicas naturales. Sin embargo, el uso de hormigón prefabricado con buenos sistemas de aislamiento también puede cumplir con los requisitos, especialmente en áreas urbanas.

4. Restricciones Urbanísticas Locales y Protección del Patrimonio

- **Zonas de Protección Patrimonial:** En algunas comunas, especialmente en áreas rurales o con gran valor histórico y cultural, existen restricciones relacionadas con la protección del patrimonio arquitectónico y cultural. Estas restricciones pueden limitar el uso de **hormigón prefabricado** en favor de sistemas constructivos más tradicionales o compatibles con el entorno

histórico, como la **madera** en construcciones rurales o áreas de interés patrimonial.

- En zonas de conservación o áreas rurales protegidas, como algunas partes de La Araucanía, las normativas locales pueden favorecer sistemas constructivos que mantengan la **identidad arquitectónica local**, lo que hace más adecuado el uso de materiales como la madera.

5. Normativa sobre la Gestión de Residuos en la Construcción

- **Decreto Supremo N°40: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental:** Este decreto regula la gestión de residuos generados en la construcción, promoviendo prácticas sostenibles para minimizar el impacto ambiental de los desechos. En proyectos ubicados en áreas rurales o cercanas a zonas de alto valor ecológico, se exige una **gestión responsable de los residuos**, lo que puede inclinar la balanza hacia sistemas constructivos como los **paneles de madera**, que generan menos residuos y son más fáciles de reciclar.

4.5.4. Análisis de eficiencia constructiva para la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile

Para proponer un análisis de la eficiencia constructiva entre los sistemas de paneles de madera y prefabricación de hormigón en la zona centro-sur de Chile deben considerarse varios factores clave como son la velocidad de construcción, los requerimientos técnicos y la mano de obra disponible en la medida que estos factores son fundamentales para determinar cuál de los dos sistemas es más adecuado en las diferentes áreas de esta macrozona, con base en sus características socioeconómicas, geográficas y climáticas. A continuación se detalla el análisis comparativo de ambos sistemas:

1. Velocidad de construcción

La velocidad de construcción utilizando paneles de madera es significativamente más alta en comparación con otros sistemas, debido a la prefabricación de los elementos fuera del sitio, lo que permite que las piezas lleguen listas para ensamblar en obra, reduciendo el tiempo total de construcción razón por la que, en la zona centro-sur, especialmente en áreas rurales y periurbanas, la logística favorece la rapidez en la instalación de paneles de madera, dado que la cercanía a los recursos forestales y las plantas de procesamiento en regiones como Ñuble, Biobío y La Araucanía facilita un acceso expedito a los materiales. Como se pudo investigar previamente, cuando se trata de proyectos de viviendas unifamiliares de interés social, los tiempos de construcción pueden reducirse hasta en un 30-50% en comparación con sistemas más tradicionales o el uso de hormigón in situ, ya que el ensamblaje de los paneles es rápido y requiere menos personal.

La prefabricación de hormigón por su parte, también ofrece ventajas en términos de velocidad en comparación con el hormigón vertido in situ, ya que las piezas prefabricadas son producidas en fábrica y luego transportadas al sitio de construcción para su ensamblaje, sin embargo, este sistema es más lento que los paneles de madera

debido al peso de los elementos y la complejidad de su manipulación y transporte, es así que, en el caso de las áreas urbanas de Biobío y Maule, donde existen plantas cercanas de prefabricación de hormigón, la logística de transporte es más eficiente, lo que reduce los tiempos de construcción, sin embargo, en zonas más alejadas o rurales de Ñuble y La Araucanía, el tiempo de transporte puede aumentar el plazo total del proyecto. El ensamblaje de las piezas prefabricadas de hormigón requiere además, el uso de maquinaria pesada que puede ralentizar la construcción en comparación con la ligereza y facilidad de manipulación de los paneles de madera, lo cual es especialmente relevante en zonas de difícil acceso o con infraestructura limitada.

En este sentido, los paneles de madera son más rápidos de instalar, especialmente en áreas rurales y periurbanas donde la infraestructura es menos densa y la cercanía a los recursos es un factor clave y el hormigón prefabricado es eficiente en áreas urbanas o periurbanas con buen acceso a plantas de producción aun cuando su instalación es más lenta debido al transporte y la necesidad de maquinaria pesada.

2. Requerimientos técnicos

Los paneles de madera son más simples en términos de requerimientos técnicos y su montaje no requiere maquinaria especializada, y en muchos casos basta con herramientas manuales o semiautomáticas, además, la construcción con paneles de madera implica una menor necesidad de ingeniería estructural compleja, lo que simplifica la gestión del proyecto. Esto es especialmente beneficioso en áreas rurales de Ñuble y La Araucanía, donde la infraestructura técnica es menos desarrollada, sin embargo, los paneles de madera deben cumplir por su parte, con estrictos estándares de resistencia sísmica y protección contra incendios, que pueden implicar en cambio tratamientos adicionales de los materiales, aumentando los costos técnicos en áreas de alto riesgo sísmico como el Biobío.

El hormigón prefabricado requiere en cambio una mayor especialización técnica, tanto en la fabricación de los elementos como en su ensamblaje ya que exige conocimientos avanzados en diseño estructural porque las piezas prefabricadas deben cumplir con estrictos códigos sísmicos y de carga estructural, lo que es particularmente relevante en regiones de alta actividad sísmica como Maule y Biobío. Además, la instalación de las piezas prefabricadas de hormigón requiere el uso de grúas y maquinaria pesada y esto aumenta la complejidad técnica del proyecto así que, en la medida que esta infraestructura no siempre está disponible en áreas rurales o más aisladas, esto podría ser causal de retraso en el avance de las obras con riesgo de incremento de los costos asociados a la movilización de equipos. Sin embargo, una vez ensambladas, las estructuras de hormigón son extremadamente resistentes y esto hace que este sistema sea preferible en proyectos donde se prioriza la durabilidad y resistencia a largo plazo.

Los paneles de madera entonces son menos exigentes desde el punto de vista técnico y pueden ser instalados con un equipo menos especializado y esto los convierte en una opción eficiente en áreas rurales o con menor disponibilidad de mano de obra calificada mientras que el hormigón prefabricado requiere mayor especialización

técnica y maquinaria pesada y estas razones lo hacen más adecuado en áreas urbanas con acceso a infraestructura y personal capacitado.

3. Disponibilidad de mano de obra

En la zona centro-sur de Chile la disponibilidad de mano de obra para trabajar con paneles de madera es mayor en áreas rurales y periurbanas, debido a la extensa actividad forestal y la tradición en el uso de la madera como material de construcción. La mano de obra no especializada puede realizar gran parte del trabajo y esto disminuye los costos laborales en comparación con sistemas más complejos. En las regiones de Ñuble, La Araucanía y parte del Biobío, hay una abundancia de trabajadores calificados en carpintería y trabajos relacionados con la madera y esto facilita el uso de este sistema constructivo, en la medida que las empresas locales de procesamiento de madera suelen ofrecer capacitación y soporte técnico, lo que a su vez, incrementa la eficiencia en la construcción con este material y empodera la capacitación local de las comunidades.

La disponibilidad de mano de obra especializada en la instalación de elementos prefabricados de hormigón es en cambio menor en zonas rurales y esto puede llegar a generar dificultades logísticas o encarecer los proyectos que utilizan este sistema. La instalación de las piezas prefabricadas requiere personal altamente capacitado para operar la maquinaria pesada y para asegurar que el ensamblaje cumpla con los estándares de seguridad y resistencia sísmica y en este sentido, en las áreas urbanas e industriales, como las ciudades de Concepción y Los Ángeles en el Biobío, la disponibilidad de trabajadores calificados para este tipo de construcción es mayor debido a la presencia de industrias constructoras y un mercado laboral más diversificado, sin embargo, en zonas más aisladas, la escasez de mano de obra puede ser un obstáculo significativo.

Por todo lo analizado en esta sección, es posible entonces decir que los paneles de madera son más fáciles de implementar en zonas rurales y periurbanas debido a la mayor disponibilidad de mano de obra no especializada y la tradición local en el uso de la madera. El hormigón prefabricado requiere por su parte de mano de obra más especializada y esto limita su eficiencia en áreas rurales, pero es más accesible en centros urbanos con una infraestructura laboral más desarrollada.

En términos de velocidad de construcción, los paneles de madera resultan más rápidos de instalar, especialmente en zonas rurales y periurbanas con acceso cercano a recursos forestales y mano de obra menos especializada, pero en cuanto a los requerimientos técnicos, los paneles de madera son menos exigentes y se pueden instalar con equipos menos especializados, mientras que el hormigón prefabricado requiere mayor especialización y maquinaria pesada y esto lo hace más adecuado para áreas urbanas.

Respecto a la disponibilidad de mano de obra, los paneles de madera son favorecidos en regiones con tradición forestal como Ñuble, Biobío y La Araucanía, mientras que el hormigón prefabricado es más eficiente en áreas urbanas donde hay mayor acceso a personal capacitado y equipos adecuados.

Por todo lo expuesto se reafirma el hecho de que la prefabricación de hormigón es más eficiente en áreas urbanas donde se requieren estructuras más robustas y duraderas, mientras que los paneles de madera son más eficientes en zonas rurales y periurbanas, donde la disponibilidad de recursos y la simplicidad técnica permiten un proceso constructivo más rápido y económico.

4.5.5. Análisis de costos de la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile

El análisis de costos asociados a los sistemas constructivos de paneles de madera y prefabricación de hormigón es fundamental para determinar cuál de estos métodos es más adecuado para las diferentes áreas de la zona centro-sur de Chile y este análisis debe incluir los costos de materiales, transporte y mantenimiento a largo plazo ya que todos estos son factores que influyen en la viabilidad económica de cada sistema constructivo en función de las condiciones geográficas, climáticas y económicas de las regiones en estudio.

1. Costos de Materiales

El costo inicial de los materiales cuando se trata de paneles de madera, particularmente pino radiata y eucalipto, es abundante en las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía y esto genera un menor costo en la adquisición de materia prima para la construcción con paneles de madera. La industria forestal está bien desarrollada en estas zonas y se facilita el acceso a productos madereros a precios competitivos. No obstante, a pesar de la abundancia de la madera, los costos pueden incrementarse si los paneles requieren tratamientos adicionales para mejorar su resistencia al fuego, a la humedad, insectos o a la actividad sísmica. Estos tratamientos son obligatorios en algunas zonas de alta humedad (La Araucanía) o de alto riesgo sísmico (Biobío) y esta sería la razón que induciría un aumento en el costo de los materiales.

El hormigón por su parte, tiene un costo inicial más elevado en comparación con la madera, debido a los materiales requeridos para su producción (cemento, arena, agua, agregados y aditivos) y aunque Chile tiene una industria cementera bien desarrollada, los materiales que componen el hormigón, especialmente los aditivos y el acero para refuerzos, son más caros que los insumos necesarios para la producción de paneles de madera y es por esto que la prefabricación de hormigón en plantas permite una mayor eficiencia en la producción, pero sigue siendo más costosa en términos de materiales comparado con la madera. Además, en áreas alejadas de las plantas de producción, los precios de los materiales pueden aumentar debido a los costos de transporte.

2. Costos de Transporte

En las regiones centro-sur de Chile, la proximidad a bosques y plantas procesadoras de madera en Ñuble, Biobío y La Araucanía disminuye significativamente los costos de transporte de este material y las distancias cortas entre las áreas de extracción y los sitios de construcción permiten que los costos logísticos sean relativamente bajos en estas regiones. Los paneles de madera son además livianos en comparación con los elementos de hormigón y esto reduce los costos de transporte, especialmente en zonas rurales con accesos más complicados o caminos de menor calidad, lo cual es

particularmente ventajoso en las áreas más alejadas de las principales ciudades donde los caminos no siempre son óptimos para transportar cargas pesadas.

El transporte de elementos prefabricados de hormigón es por otro lado, considerablemente más costoso que el de paneles de madera debido al peso y volumen de las piezas y en las áreas más urbanas, como Concepción o Talca, donde las plantas de producción están relativamente cerca de los sitios de construcción, los costos de transporte pueden ser manejables. Sin embargo, en zonas rurales de Ñuble o La Araucanía, los costos pueden llegar a incrementarse drásticamente debido a las largas distancias y la necesidad de transportar maquinaria pesada. En áreas con infraestructuras viales limitadas o en mal estado, el transporte de grandes elementos de hormigón prefabricado puede además enfrentar restricciones de acceso y con ello se aumentan los costos logísticos. Además, la necesidad de grúas y equipos especializados para mover estos elementos también aumenta los costos de transporte y movilización.

3. Costos de Mantenimiento a Largo Plazo

La madera, aunque sostenible y ecológica, requiere un mantenimiento más frecuente en comparación con el hormigón, especialmente en zonas de alta humedad, como La Araucanía. La exposición prolongada a condiciones de humedad y cambios climáticos puede provocar deformaciones, deterioro o problemas de plagas y esto obliga a realizar tratamientos y reparaciones periódicas. Para extender la vida útil de las construcciones de madera, es necesario entonces aplicar tratamientos protectores contra la humedad, plagas y fuego que pueden ser costosos y deben renovarse periódicamente con lo que se incrementan los costos de mantenimiento a largo plazo, especialmente en zonas climáticamente adversas. Es así que, objetivamente hablando, aunque el costo inicial de los paneles de madera es más bajo, los gastos en mantenimiento pueden aumentar significativamente con el tiempo, sobre todo en zonas donde las condiciones climáticas son más severas y cuando este criterio es trasladado al caso de las viviendas sociales donde es el poblador quien deberá asumir esos costos, puede llegar a existir más rechazo hacia este tipo de proyectos por estas razones.

El hormigón por su parte es un material altamente duradero y resistente, especialmente en zonas de alto riesgo sísmico como Biobío y Maule y los costos de mantenimiento asociados, a largo plazo son mucho menores en comparación con la madera ya que el hormigón requiere menos intervenciones regulares y esto lo convierte en una opción rentable a largo plazo, especialmente en proyectos donde se espera una vida útil prolongada de las construcciones. El hormigón además, es resistente a la humedad, plagas y otros factores ambientales y esto lo convierte en una opción más económica en términos de mantenimiento, especialmente en regiones húmedas como La Araucanía. En áreas urbanas y periurbanas donde la exposición a contaminantes también puede ser un problema, el hormigón presenta además una mayor resistencia frente a la corrosión. Por muchas de estas razones, aunque el costo inicial del hormigón es más elevado, su menor requerimiento de mantenimiento hace que sea una opción económicamente más eficiente a largo plazo en zonas donde la durabilidad y resistencia estructural son cruciales.

En áreas rurales y periurbanas donde la proximidad a los recursos madereros es alta y la infraestructura vial puede no ser adecuada para el transporte de elementos pesados, los paneles de madera resultan por todo lo expuesto, más eficientes en términos de costos de materiales y transporte. La disponibilidad local de madera reduce significativamente los costos logísticos, y aunque los costos de mantenimiento a largo plazo pueden ser más altos, la simplicidad en la construcción y la velocidad de instalación compensan esta inversión. En estas zonas, el hormigón prefabricado puede no ser una opción viable debido a los altos costos de transporte y la necesidad de equipos especializados. Además, en regiones donde la demanda de viviendas de interés social no requiere construcciones de gran altura o alta complejidad, el uso de hormigón no sería económicamente justificable.

En áreas urbanas o altamente industrializadas, como Concepción en la región del Biobío y Talca en la región del Maule, donde las plantas de prefabricación de hormigón están cercanas y el acceso a infraestructura es mayor, el hormigón prefabricado es la opción más eficiente. El transporte es más manejable y el costo inicial más alto se compensa con la durabilidad y los bajos costos de mantenimiento a largo plazo. En estas áreas, los paneles de madera pueden seguir siendo sin embargo una opción competitiva para ciertos tipos de construcción, pero su uso podría estar limitado a proyectos de menor escala o en zonas periurbanas cercanas. En proyectos que demandan una alta resistencia estructural, como edificios en altura o construcciones en zonas de alto riesgo sísmico, el hormigón prefabricado es la opción preferida.

Los paneles de madera son entonces más económicos en términos de costos iniciales de materiales y transporte, particularmente en zonas rurales y periurbanas cercanas a las fuentes de madera pero aun así, los costos de mantenimiento a largo plazo pueden aumentar, especialmente en áreas con condiciones climáticas adversas.

La prefabricación de hormigón es por su parte más costosa en términos iniciales, pero resulta más eficiente a largo plazo debido a sus menores costos de mantenimiento y alta durabilidad. Este sistema es entonces más adecuado para áreas urbanas o en zonas donde se requieren estructuras altamente resistentes, como en regiones con alta actividad sísmica o alta humedad. La elección del sistema constructivo dependerá entonces de la ubicación geográfica, la proximidad a los recursos, las características climáticas y las necesidades específicas del proyecto en términos de durabilidad y mantenimiento.

4.5.6. Análisis de sostenibilidad ambiental de la construcción en la Zona Centro-Sur de Chile

El análisis del ciclo de vida y la huella de carbono refuerza sin mayor discusión las ventajas ambientales del uso de paneles de madera en zonas rurales y forestales, donde la reducción en las emisiones de carbono y la eficiencia energética son primordiales, pero por otro lado, en las áreas urbanas con alta densidad y mayores exigencias estructurales, el hormigón prefabricado sigue siendo una opción preferible, a pesar de su mayor impacto inicial, debido a su resistencia y durabilidad en el tiempo.

La elección de los paneles de madera es más sostenible en todo caso para las áreas rurales y periurbanas del Ñuble, el Biobío y la Araucanía, no solo por la menor huella de carbono

derivada de la proximidad a los recursos, sino también por la captura de carbono que ofrecen las estructuras de madera a lo largo de su vida útil, más allá de la capacidad de integración con el entorno natural y el uso de recursos locales que hacen que sea una opción respetuosa con el medio ambiente.

En ciudades de mayor densidad, como Concepción o Talca en el Maule y el Biobío, el uso de hormigón prefabricado es preferible por su durabilidad y su capacidad para resistir cargas sísmicas porque se minimiza la necesidad de mantenimiento o reconstrucción a lo largo del tiempo y aunque su huella de carbono sea mayor en la etapa de producción, esta puede llegar a ser compensada por la reducción de intervenciones futuras.

4.5.7. Zonas adecuadas para paneles de madera en la construcción de viviendas sociales de Zona Centro-Sur de Chile

1. Región del Maule

Las áreas rurales al este de Talca y Curepto tienen fácil acceso a recursos forestales cercanos y son de baja densidad, lo cual facilita el transporte y utilización de paneles de madera. El acceso a pino radiata y eucalipto en esta zona, junto con las buenas condiciones climáticas (mediterráneo templado), favorecen el uso de la madera, reduciendo los costos de transporte y promoviendo una construcción eficiente.

2. Región de Ñuble

La Zona rural y periurbana al norte de Chillán y al este de San Carlos es ideal debido a la gran disponibilidad de recursos forestales y a la menor densidad de construcción, lo que facilita la implementación de paneles de madera para viviendas unifamiliares. La cercanía a recursos forestales y plantas de procesamiento maderero convierte además a esta zona en un lugar óptimo para la construcción en madera, donde los costos logísticos son bajos y el clima permite la durabilidad de la madera.

3. Región del Biobío

La Zona forestal y rural de Yumbel y alrededores de Los Ángeles son regiones que tienen excelente acceso a recursos de pino y eucalipto, así como infraestructura de procesamiento en las cercanías, lo que reduce los costos y facilita la construcción. La presencia de infraestructura maderera y la cercanía de las áreas forestales disminuyen significativamente los costos logísticos y energéticos, favoreciendo la construcción en madera en estas zonas rurales.

4. Región de La Araucanía

La Zona rural y forestal alrededor de Nueva Imperial y Carahue, cercana a los recursos madereros y con un clima adecuado para la construcción en madera, es ideal para este sistema constructivo, además, la alta disponibilidad de madera y un clima templado húmedo adecuado para este tipo de construcción convierten a esta área en una excelente candidata para el uso de paneles de madera, aprovechando además la cercanía a plantas de procesamiento.

4.5.8. Zonas adecuadas para la prefabricación de hormigón en la construcción de viviendas sociales de la Zona Centro-Sur de Chile

1. Región del Maule

La Zona urbana de Talca y sus alrededores es un área de alta densidad y está cerca de plantas de producción de hormigón, lo cual reduce los costos de transporte y facilita el acceso a materiales. La sismicidad de la zona también favorece el uso de hormigón, que ofrece mayor durabilidad y resistencia. La cercanía a la infraestructura y la capacidad de resistencia sísmica del hormigón prefabricado lo convierten en el sistema constructivo preferente para edificios en altura y proyectos urbanos en Talca, donde también se requiere alta durabilidad en las construcciones.

2. Región de Ñuble

En la Zona urbana de Chillán y San Carlos la infraestructura de prefabricación de hormigón es accesible y el entorno urbano justifica el uso de este material en construcciones de gran escala que requieran resistencia sísmica y durabilidad. La alta densidad de Chillán, combinada con la cercanía de recursos y el alto riesgo sísmico, hace que el uso de hormigón prefabricado sea una opción más adecuada para asegurar estructuras duraderas y de bajo mantenimiento en áreas urbanas.

3. Región del Biobío

En el Área metropolitana de Concepción y alrededores se encuentran los principales polos industriales de Chile, con infraestructura robusta para la producción de hormigón prefabricado. Su densidad poblacional y la sismicidad de la región hacen que el hormigón sea el material ideal para construcciones de gran altura y proyectos de infraestructura, por lo que, en este sentido, la infraestructura industrial y la cercanía a plantas de producción de hormigón reducen costos y facilitan el transporte de elementos prefabricados. Además, la alta densidad poblacional y la exposición a eventos sísmicos recurrentes hacen del hormigón una opción estructuralmente ventajosa y sostenible en el largo plazo.

En Los Ángeles, la disponibilidad de plantas de hormigón y su rol como centro regional hacen que el hormigón prefabricado sea eficiente en términos de transporte y montaje en construcciones urbanas. La infraestructura cercana y la alta densidad en Los Ángeles justifican por ello igualmente, el uso de hormigón, que aporta resistencia y menores costos de mantenimiento en áreas de urbanización creciente y con alta exposición sísmica.

4. Región de La Araucanía

Las zonas urbanas de Temuco y alrededores como principales centros urbanos de La Araucanía cuentan con plantas de producción de hormigón y están en una zona sísmica. La alta densidad y el clima húmedo favorecen a su vez, el uso de hormigón prefabricado para garantizar durabilidad y seguridad estructural. La infraestructura cercana y la necesidad de resistencia a la humedad y a los sismos hacen en este sentido

que el hormigón prefabricado sea el material óptimo en esta área urbana de alta densidad.

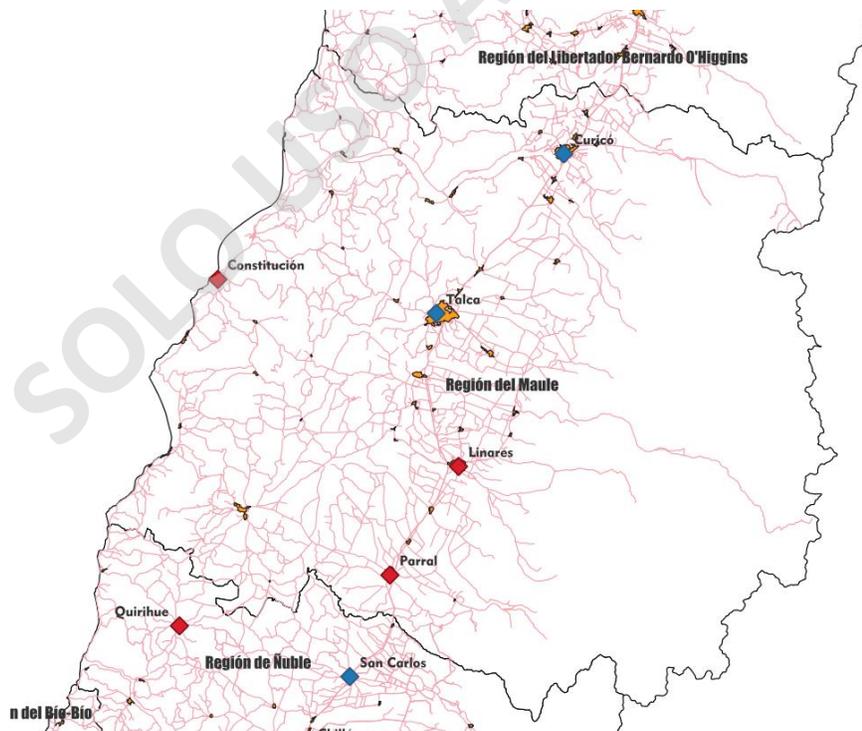
4.5.9. Mapa de zonificación

A continuación, se presentan los mapas correspondientes a las cuatro regiones seleccionadas para este estudio: **Región del Maule**, **Región de Ñuble**, **Región del Biobío**, y **Región de La Araucanía**. En estos mapas elaborado en QGis, se han colocado puntos en las ciudades previamente seleccionadas, indicando la preferencia de uso de un material constructivo sobre otro, de acuerdo con los análisis realizados sobre los factores de disponibilidad de recursos locales, densidad poblacional y características geográficas y ambientales de cada zona.

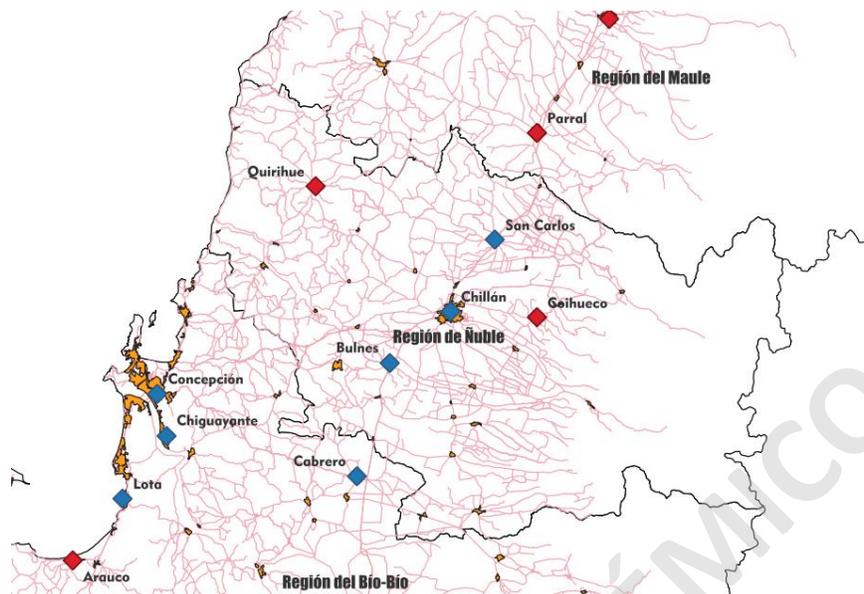
Los puntos en **color rojo** representan las ciudades o localidades donde se ha determinado que la **madera** es el material más adecuado para la construcción de viviendas sociales, debido a su proximidad a fuentes forestales, la sostenibilidad ambiental, y su eficiencia constructiva en áreas rurales o semiurbanas.

Por otro lado, los puntos en **color azul** indican aquellas ciudades o localidades donde se recomienda el uso de **hormigón** prefabricado como material principal de construcción. Estas zonas corresponden principalmente a áreas urbanas con mayor densidad poblacional, donde la durabilidad, resistencia sísmica y otras ventajas del hormigón son más apropiadas.

Figura 19: Región del Maule

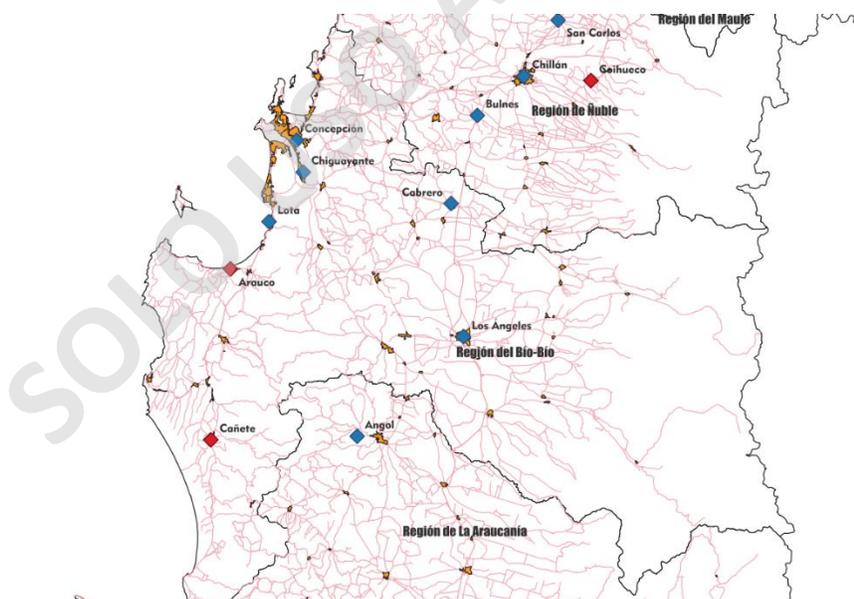


Fuente: Elaboración propia según análisis previo
Figura 20: Región del Ñuble



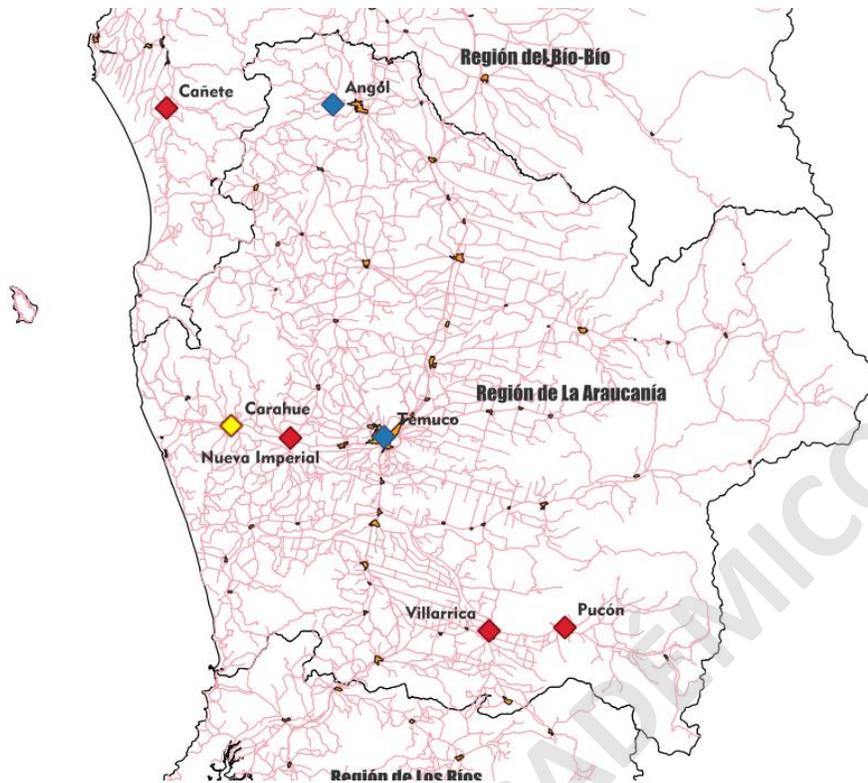
Fuente: Elaboraci3n propia segun an3lisis previo

Figura 21: Regi3n del Bío Bío



Fuente: Elaboraci3n propia segun an3lisis previo

Figura 22: Regi3n de la Araucan3a



Fuente: Elaboración propia según análisis previo

La zonificación representada mediante puntos o nodos en los mapas se fundamenta en la necesidad de identificar con precisión aquellas ciudades que responden de manera óptima a los criterios de cada paradigma constructivo, en lugar de delimitar amplias áreas geográficas como departamentos o regiones. Se decidió trabajar con nodos y no con polígonos en la medida que estos permiten resaltar mejor las ubicaciones específicas donde se encuentran las condiciones ideales para la implementación de sistemas constructivos, como disponibilidad de recursos materiales, infraestructura y condiciones ambientales particulares. El uso de puntos también facilita una representación más exacta de las características urbanas y periurbanas de cada localidad, evitando la generalización de características a zonas contiguas que podrían no compartir las mismas condiciones óptimas. En este sentido, la elección de nodos destaca las ciudades y localidades clave que cumplen los parámetros definidos para el uso eficiente de paneles de madera o prefabricación en hormigón, esperando proporcionar de esa manera una herramienta de planificación precisa y focalizada en áreas con las mejores condiciones para el desarrollo sostenible y económico de proyectos habitacionales.

Conclusiones

Al concluir esta investigación se ha podido lograr que los resultados respalden la hipótesis inicial de que ambos sistemas constructivos, el sistema constructivo industrializado de paneles de madera y el método de prefabricación de hormigón, tienen sus méritos y limitaciones, y que la elección entre uno y otro debe basarse en una evaluación detallada de los requerimientos específicos del proyecto, las condiciones locales y las políticas de sostenibilidad aplicables.

Inicialmente, el análisis comparativo entre el sistema constructivo industrializado de paneles de madera y el método de prefabricación de hormigón revela que la madera es competitiva en términos de costos y tiempo de construcción, además de ofrecer ventajas significativas en eficiencia energética y reducción de la huella de carbono. A continuación, se detallan los datos y elementos de la investigación que sustentan estas afirmaciones:

Costos y Tiempo de Construcción

- **Reducción en el Tiempo de Construcción:** Los sistemas constructivos basados en paneles de madera permiten una prefabricación y montaje más rápidos que los métodos tradicionales, como el hormigón. La madera, al ser más ligera y fácil de manipular, reduce significativamente los tiempos de construcción. Esto se traduce directamente en costos laborales más bajos y en una reducción de los costos indirectos asociados a la duración del proyecto.
- **Costos de Materiales y Fabricación:** Aunque el costo inicial de los materiales de madera puede ser más alto comparado con algunos métodos de construcción de hormigón, los costos generales se ven reducidos por la menor necesidad de maquinaria pesada y logística menos compleja para el transporte y montaje. Además, los avances en tecnologías de fabricación y la posibilidad de prefabricar elementos en un entorno controlado disminuyen los desperdicios y optimizan el uso del material.

Eficiencia Energética y Huella de Carbono

- **Propiedades Aislantes de la Madera:** La madera tiene propiedades aislantes naturales superiores que muchos otros materiales de construcción, lo que resulta en un mejor rendimiento térmico de los edificios. Esto reduce la necesidad de calefacción y refrigeración, disminuyendo el consumo de energía y, por ende, los costos energéticos durante la vida útil del edificio.
- **Captura de Carbono:** La madera es un material único porque secuestra carbono durante su ciclo de vida. El carbono absorbido por los árboles durante su crecimiento permanece almacenado en la madera durante toda la vida útil del edificio, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono. Esta característica es fundamental en el contexto del cambio climático y los esfuerzos por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Análisis del Ciclo de Vida (ACV):** Los estudios de ACV incluidos en la investigación compararon los impactos ambientales totales de los edificios construidos con madera y hormigón desde la extracción de materias primas hasta la

demolición. Los resultados demostraron que los edificios de madera tienen un impacto ambiental significativamente menor en términos de emisiones de CO₂, consumo de energía y generación de residuos.

- **Normativas y Certificaciones Ambientales:** La madera, especialmente cuando proviene de fuentes gestionadas de manera sostenible y certificada, cumple con varias normativas ambientales y puede contribuir a obtener certificaciones de construcción verde como LEED o BREEAM, que valoran la eficiencia energética y la minimización del impacto ambiental.

En este sentido, la evaluación del desempeño ambiental compara de manera integral los sistemas constructivos de paneles de madera y de hormigón prefabricado, destacando las diferencias en términos de impacto ambiental durante las etapas de construcción, uso, y su vida útil en general. A continuación, se profundiza en los detalles proporcionados por la investigación para explicar cómo cada material presenta ventajas y desventajas específicas:

Impacto Ambiental y Uso Energético de la Madera

- **Menor Impacto Ambiental Durante la Construcción:** La construcción con madera genera menos residuos en comparación con el hormigón, principalmente porque los componentes de madera se pueden prefabricar con alta precisión, minimizando el corte y la manipulación in situ. Esto reduce la cantidad de desechos generados y disminuye la contaminación ambiental asociada a los procesos constructivos.
- **Capacidad de Aislamiento Natural:** La madera es reconocida por sus excelentes propiedades aislantes. Esto significa que los edificios construidos con paneles de madera tienden a tener mejor aislamiento térmico comparados con aquellos de hormigón, lo que se traduce en menor demanda energética para calefacción y refrigeración. Este aspecto es crucial en términos de eficiencia energética y contribuye a reducir el consumo de energía a lo largo de la vida útil del edificio.
- **Almacenamiento de Carbono:** Como se mencionó anteriormente, la madera tiene la capacidad de capturar y almacenar carbono a lo largo de su vida útil. Esta característica reduce la huella de carbono total del edificio, haciendo que la construcción de madera sea una opción más sostenible en comparación con materiales que no secuestran carbono, como el hormigón.

Ventajas del Hormigón en Durabilidad y Resistencia

- **Durabilidad:** El hormigón es extremadamente duradero y puede soportar condiciones climáticas adversas y el desgaste por uso durante períodos prolongados sin necesidad de mantenimiento significativo. Esta durabilidad se traduce en una vida útil más larga del edificio, lo cual es una consideración importante en la evaluación de la sostenibilidad a largo plazo.
- **Resistencia a Desastres Naturales:** El hormigón ofrece una resistencia superior en situaciones de desastres naturales como terremotos, huracanes e inundaciones. Su masa y robustez proporcionan una estructura que es inherentemente más resistente a las cargas sísmicas y a los impactos de vientos fuertes. En regiones propensas a tales fenómenos, esto puede ser un factor determinante en la elección del material constructivo.

- **Menor Impacto Ambiental a Largo Plazo:** Aunque la producción de hormigón es energéticamente intensiva y genera mayores emisiones de CO₂ inicialmente, la durabilidad y la resistencia del material pueden resultar en un menor impacto ambiental total a lo largo de la vida útil del edificio. Esto se debe a que las estructuras de hormigón raramente necesitan ser reemplazadas o reparadas tan frecuentemente como otros materiales.

La elección entre madera y hormigón debe considerar por lo tanto, factores como las condiciones climáticas locales, la prevalencia de desastres naturales, las expectativas de durabilidad y la eficiencia energética deseada para el edificio. La investigación concluye en este sentido, que ambas opciones tienen su lugar en el panorama de la construcción sostenible, dependiendo de las prioridades y objetivos específicos del proyecto.

Es por todo lo expuesto hasta aquí que en el contexto de la construcción sostenible, la adopción de políticas que fomenten prácticas más verdes y la educación continua de los profesionales del sector son fundamentales para garantizar una implementación efectiva y aceptada de nuevas tecnologías y materiales. Asimismo, la actualización de las normativas es crucial para reflejar los avances tecnológicos y asegurar que las construcciones locales cumplan con los estándares internacionales de sostenibilidad. A continuación, se detallan las razones que sustentan estas recomendaciones:

Promoción de Políticas para Prácticas de Construcción Sostenible

- **Respuesta a las Demandas Socioambientales:** Las políticas que promueven prácticas sostenibles responden a un creciente interés público por el medio ambiente y la responsabilidad social. Adoptar estas políticas no solo mejora la imagen pública de las empresas y los gobiernos, sino que también responde a las expectativas de los consumidores y ciudadanos que cada vez más valoran la sostenibilidad en su entorno construido.
- **Incentivación de la Innovación:** Al fomentar la utilización de materiales sostenibles como la madera, las políticas pueden incentivar la innovación en la industria. La madera, por ejemplo, se alinea con objetivos de reducción de carbono y eficiencia energética, pero su adopción requiere de tecnología avanzada y métodos de construcción que maximicen sus propiedades beneficiosas.
- **Mitigación de Impactos Ambientales:** A través de políticas enfocadas, se puede regular el uso de materiales y prácticas que minimicen el impacto ambiental, como la gestión de residuos, el uso eficiente de recursos y la reducción de emisiones en la fase de construcción.

Educación de los Profesionales del Sector

- **Capacitación en Nuevas Tecnologías:** La educación continua permite a los profesionales del sector construcción estar al día con los últimos avances en materiales y técnicas de construcción, como la eficiencia de los paneles de madera o las tecnologías de prefabricación de hormigón.
- **Mejora de la Aceptación Pública:** La educación puede también servir para informar y tranquilizar al público sobre la seguridad, durabilidad y beneficios de los nuevos métodos de construcción. Esto es especialmente relevante en contextos donde hay

resistencia o escepticismo hacia materiales como la madera, debido a percepciones de menor durabilidad.

Actualización de Normativas

- **Alineación con Estándares Internacionales:** La actualización de las normativas locales para reflejar los avances en los métodos de construcción y los materiales utilizados es crucial para mantener la competitividad internacional. Esto asegura que las construcciones no solo sean sostenibles, sino también seguras y eficientes de acuerdo con los mejores estándares y prácticas globales.
- **Fomento de la Competitividad y la Innovación:** Normativas actualizadas pueden fomentar una competencia justa en la industria, promoviendo el uso de técnicas y materiales que, aunque puedan ser inicialmente más costosos, ofrezcan beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

Contexto Político y Mediático

El soporte político y mediático en torno al uso de materiales específicos debe basarse en una comprensión clara de sus beneficios y limitaciones, no solo en consideraciones de costos iniciales. Es crucial que las decisiones sobre materiales de construcción se fundamenten en análisis detallados del ciclo de vida, que consideren la durabilidad, el mantenimiento, el impacto ambiental y la eficiencia energética. Esto ayudará a contrarrestar críticas no fundamentadas y a construir una percepción pública bien informada y positiva sobre los avances en la construcción sostenible.

Por tanto, es esencial que las políticas, la educación y la normativa en el sector de la construcción se desarrollen e implementen de manera que prioricen la sostenibilidad y el beneficio a largo plazo sobre el ahorro de costos inmediatos, garantizando así un desarrollo que sea verdaderamente sostenible y beneficioso para todos los actores involucrados.

En términos de zonificación, se ha determinado que las áreas rurales y periurbanas de estas regiones, con cercanía a recursos forestales y menor densidad poblacional, presentan mayores ventajas para la implementación de construcciones en madera. Este material no solo reduce la huella de carbono, sino que también permite una mayor sostenibilidad a largo plazo, contribuyendo al aprovechamiento de los recursos locales y a la disminución del impacto ambiental.

Por otro lado, en las zonas urbanas y de mayor densidad poblacional, el hormigón prefabricado ha sido identificado como el material más eficiente debido a su durabilidad, resistencia sísmica y capacidad para cumplir con las demandas estructurales de las áreas urbanizadas. En particular, los centros urbanos con mayor actividad industrial y comercial requieren una infraestructura más robusta, y el uso de hormigón en estas áreas asegura una mayor estabilidad y resistencia en el tiempo.

El análisis realizado a través de la zonificación y la categorización de los centros urbanos ha permitido una visualización clara y precisa de las áreas donde cada material es más adecuado, lo cual proporciona una herramienta útil para futuros proyectos de planificación de vivienda

social, facilitando la toma de decisiones en función de criterios objetivos que incluyen tanto la sostenibilidad ambiental como la eficiencia constructiva.

Finalmente, el trabajo realizado establece una base para la planificación urbana y rural en estas cuatro regiones, destacando la importancia de adaptar las estrategias constructivas a las características específicas de cada zona. La correcta selección de los materiales no solo mejora la calidad de vida de las comunidades, sino que también optimiza los recursos disponibles, promoviendo un desarrollo sostenible en las regiones analizadas.

SOLO USO ACADÉMICO

Referencias bibliográficas

- Aliaga Villarroel, A. (2022). *Análisis comparativo del método tradicional de hormigón prefabricado y madera, considerando durabilidad, resistencia al fuego y métodos constructivos en edificios de mediana altura*. Santiago de Chile: Universidad de Chile [Tesis de grado].
- Alvarado Alvarado, F. (2019). *Madera sustentable como material de construcción de edificaciones contra el cambio climático*. Concepción: Universidad Técnica Federico Santa María [Tesis de grado].
- Alvarado Duffau, A. (2018). *Avances y desafíos del Sistema Nacional de Inversiones*. Santiago: Ministerio de Desarrollo Social
- Aravena, R. (2018). *Estudio de asimilación de resistencia al fuego de entrepiso*. Santiago: Centro UC de Innovación en Madera - Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Banco Mundial. (2020). *La construcción de viviendas de madera en Chile. Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación*. Washington DC: The World Bank.
- BID. (2020). *Manual de implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción*. Mendoza: BID - Presidencia de la Nación Argentina.
- BID. (2021). *Manual del desempeño ambiental de los materiales y tecnologías utilizadas en la construcción de las viviendas sociales*. Mendoza: BID- Presidencia de la Nación Argentina
- Cámara Chilena de la Construcción. (2020). *Impulsar la productividad de la industrial de la construcción en Chile a estándares mundiales*. Santiago: Matrix Consulting
- Carrizo, S., Azqueta, P., Strier, D., & Gil, S. (2021). *Vivienda social sostenible*. Buenos Aires: Cámara argentina de la construcción.
- Centro UC de Innovación en Madera. (2019). *Análisis del estado de la construcción en madera en Chile: Estadísticas de elección de materialidad y costos de construcción*. Santiago: Centro UC de Innovación en Madera.
- Centro UC de Innovación en Madera. (2023). *Los costos que rodean a la construcción con madera en Chile: números, efectos y acciones*. Santiago: Centro UC de Innovación en Madera.

- Cid, A., Ugarte, J., Rodríguez, G., Serra, E., & Cárcamo, S. (2017). Análisis de costo de la vivienda social en Chile: Identificación de las oportunidades de la construcción en madera. *CLEM+CIMAD* (págs. 1-6). Junín, Buenos Aires: UNNOBA
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible - CCCS. (Abril de 2024). *Sostenibilidad en la construcción*. Obtenido de CCCS: <https://www.ccs.org.co/wp/sostenibilidad-en-la-construccion/>
- Cortés Cely, O. (2016). Propiedades que definen los materiales resilientes en arquitectura. *Revista de Tecnología 14(1)*, 117-126.
- de Burca, J. (13 de octubre de 2023). *La economía de la construcción sostenible: Beneficios de costos a largo plazo*. Obtenido de Constructive voices: <https://constructive-voices.com/es/la-economia-de-la-construccion-sostenible-beneficios-de-costos-a-largo-plazo/>
- del Coz Díaz, J., & Suárez Sierra, J. (2024). *Construcción industrializada sostenible: los edificios y las viviendas que necesitamos*. Obtenido de ambient@: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM%2FAmbienta_2010_93_7_8.pdf
- de Sutter Arroyo, Y. (2015). *Viviendas prefabricadas de hormigón realizadas mediante una planta móvil a pie de obra dirigida a los estratos socioeconómicos bajos*. Santiago: Universidad de Chile [Tesis de posgrado].
- Faulconer Pettit, W., Montenegro Parra, C., & Cancino Quijada, E. (2021). *Manual de planes de manejo ambiental para obras concesionadas. Versión 8.0*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas
- Ferrer García, M., & Spairani Berrio, S. (2009). Análisis de la valoración de la sostenibilidad de los materiales de construcción. *SCTV Barcelona*, 405-416.
- Flores Pineda, S. (2022). *Estudio técnico, económico y ambiental del uso de la madera contralaminada como alternativa a la construcción de viviendas sociales en Chile*. Santiago: Universidad Diego Portales [Tesis de grado]
- Garay Moena, R., & Benedetti Ruiz, S. (2024). Calificación de viviendas prefabricadas en madera basada en atributos de cumplimiento normativo, complejidad y sustentabilidad en Chile Central. *Revista Hábitat Sustentable 14(1)*, 92-101

- García Marquina, E. (2013). Estudio diagnóstico sobre las posibilidades de desarrollo de una edificación residencial industrializada dirigida a satisfacer las necesidades de vivienda pública y muy especialmente en alquiler en la comunidad autónoma del País Vasco. *Programa Eraikal*, 73-124.
- Gobierno de Chile. (2017). *Plan de acción nacional de cambio climático 2017-2022*. Santiago: Gobierno de Chile
- Gysling, J., Kahler, C., Soto, D., Mejías, W., Poblete, P., Álvarez, V., . . . Pardo, E. (2021). *Madera y construcción. Hacia una simbiosis estratégica*. Santiago: INFOR.
- Holz, M. (2022). *Evolución del Índice de precios de materiales de la construcción: actualización a septiembre de 2022*. Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Juárez Montilla, C. (2020). *Madera vs. hormigón: Fortalezas y debilidades en su uso estructural*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid [Tesis de Grado].
- Kraljevich, F. (Mayo de 2024). *Nuevas normas para prefabricados de hormigón: Norma general y para elementos específicos*. Obtenido de Hormigón al día: <https://hormigonaldia.ich.cl/recomendaciones-tecnicas/nuevas-normas-para-prefabricados-de-hormigon-norma-general-y-para-elementos-especificos/>
- Madera 21. (2024). *Barrio Ecosustentable Oasis de Chañaral*. Obtenido de Madera 21 de Corma: <https://www.madera21.cl/blog/project-view/barrio-ecosustentable-oasis-de-chanaral/>
- Martínez, T. (25 de JUNIO de 2021). *Prefabricados de hormigón y el potencial de la construcción híbrida en edificación en altura*. Obtenido de CCI: <https://construccionindustrializada.cl/2021/06/25/prefabricados-de-hormigon-y-el-potencial-de-la-construccion-hibrida-en-edificacion-en-altura/>
- Méndez Ramírez, J., Becerril Sánchez, T., & Gutiérrez Chaparro, J. (2021). Condiciones de habitabilidad de la vivienda sustentable de interés social. Caso "Los Héroes San Pablo II", Tecamac, Estado de México. *Revista de Estudios territoriales* 23(1), 131-149.
- Ministerio de Obras Públicas [MOP]. (2018). *Sustentabilidad en el MOP. Estrategias y desafíos*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas

- Nor Azmi, A., Nor Ainah, A., Rosnah, Y., Napsiah, I., & Aini, J. (2012). Environmental awareness and benefits of industrialized building systems. *Procedia. Social and Behavioral Sciences* 50, 392-404.
- Pascual Román, N. (2014). *La eficiencia energética en el uso de la vivienda. Factores incidentes*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia [Tesis de maestría].
- Peralta, B. (2022). *Estrategia de economía circular para Chile. Soluciones habitacionales sostenibles*. Santiago: CEPAL
- Quinceno Peláez, A. (18 de 05 de 2023). *Qué es la arquitectura sostenible y cómo impacta en el diseño de un futuro mejor?* Obtenido de Alcaldía de Medellín: <https://www.medellin.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias/que-es-la-arquitectura-sostenible-y-como-impacta-en-el-diseno-de-un-futuro-mejor/>
- Rakes, K., Urriola Cuevas, C., Pica Téllez, A., Gonzales, L., Pérez, G., Sime, M., . . . Vogt Schilb, A. (2023). *Guía para la acción climática en municipios y gobiernos regionales. Hacia territorios carbono-neutrales y resilientes ante el cambio climático*. SSG-BID.
- Romano Castañeda, C., Linares Triana, E., Cabeza Alarcón, M., Gaitán Varón, M., Sánchez Pico, M., & Mojica Oyuela, S. (2022). *Guía de materiales para la construcción sostenible*. Bogotá: Ministerio del ambiente y desarrollo sostenible.
- Sánchez, J., Domínguez, R., León, M., Samaniego, J., & Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad*. Santiago: CEPAL
- Santa María, H., Salinas, Á., Montaña, J., Ugarte, J. J., Almazán, J. L., Guindos, P., . . . Jara, A. (2019). *Assessment of seismic design factors and proposal of modification to Chilean seismic building design standard (Nch 433) for mid-rise wood light-frame building* . Santiago: Centro UC de Innovación en Madera
- Secretaría de Vivienda de Argentina. (2019). *Estándares mínimos de calidad para viviendas de interés social*. Buenos Aires: Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Presidencia de la Nación Argentina.
- Schueftan, A., Aguilera, F., Aravena, C., & Benedetti, S. G. (2021). *Incentivos para Impulsar la Construcción en Madera en Chile*. . Santiago: Instituto Forestal

- Vega Clemente, R. (2015). *Evaluación de la sostenibilidad de sistemas de construcción industrializados de fachada en edificios de vivienda colectiva*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid [Tesis doctoral].
- Wiche Latorre, P., Rodríguez Droguett, B., & Bianchi Granato, D. (2020). *Estado del arte de huella de carbono para edificaciones*. Santiago: ECOED
- Wood, J. (08 de 02 de 2024). *3 materiales sostenibles que impulsan la transición hacia las energías renovables*. Obtenido de World Economic Forum: <https://es.weforum.org/agenda/2024/02/3-materiales-sostenibles-que-impulsan-la-transicion-hacia-las-energias-renovables/>
- Zilic, F., Elissetche, J., & Hernández, V. (2019). *Oportunidades de manufactura avanzada para la industria de la construcción en madera*. Concepción: Polomadera