

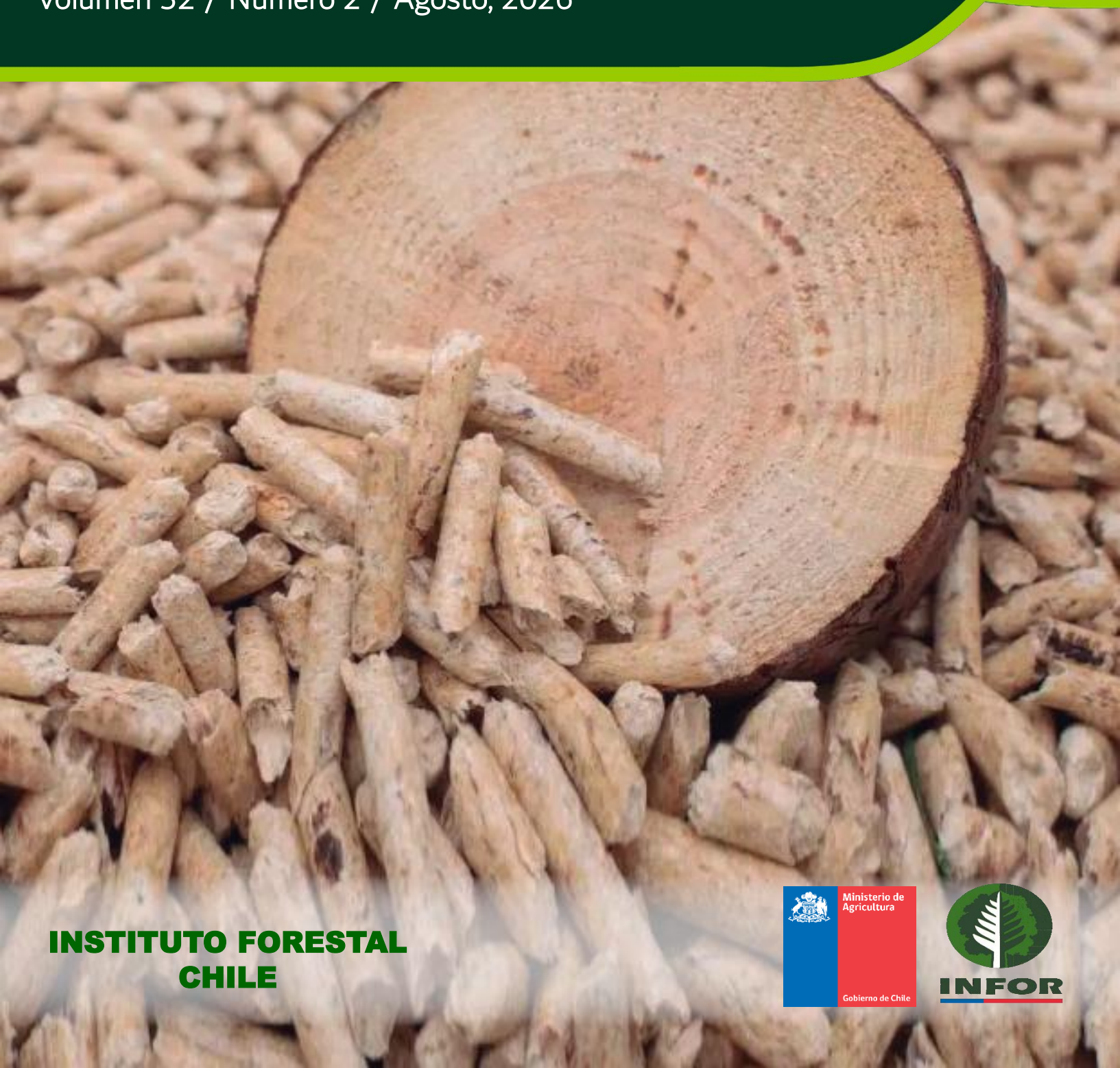
ISBN 0718-4646

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



<https://revista.infor.cl>

Volumen 32 / Número 2 / Agosto, 2026



**INSTITUTO FORESTAL
CHILE**





<https://revista.infor.cl>



REVISTA CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL. INSTITUTO FORESTAL. CHILE.

La revista Ciencia & Investigación Forestal es una publicación científico-técnica, en español, publicada por el Instituto Forestal desde el año 1987. Es una publicación de acceso abierto, seriada, arbitrada, en formato digital y de carácter interdisciplinario.

La revista divulga investigación y ciencia forestal con una visión aplicada, orientada principalmente a los profesionales y técnicos del sector forestal, que demandan soluciones para sus problemas en el corto y mediano plazo; a los profesionales del sector público y privado, investigadores, académicos, personeros con responsabilidad en la toma de decisiones técnico-políticas y, en general, a la sociedad interesada en el conocimiento de los múltiples bienes y servicios que proveen los ecosistemas forestales.

Ciencia & Investigación Forestal publica contribuciones originales e inéditas de investigadores y profesionales, de instituciones nacionales o extranjeras, interesados en publicar investigación aplicada en el ámbito de las ciencias forestales y materias afines en las temáticas económicas, sociales y ambientales.

Todas las contribuciones presentadas a la revista son sometidas a un proceso de revisión por pares (*peer review*) bajo la modalidad de doble ciego.

La periodicidad de publicación es de tres números por año, con números especiales ocasionales.

La revista provee acceso libre a su contenido bajo el principio de hacer disponible la investigación al público para fomentar un mayor intercambio de conocimiento global. No existe costo por acceso a las contribuciones publicadas y los autores no asumen ningún costo por el procesamiento, revisión, edición y publicación de sus contribuciones.

En el sitio web de la revista (<https://revista.infor.cl>) es posible acceder a todos los números publicados y también encontrar toda la información referente a Equipo Editorial, Propiedad Intelectual, Declaración de Privacidad, Tipo de Contribuciones y la Guía y Recomendaciones para Autores. Se trata de una plataforma OJS (*Open Journal Systems*) en la cual, además de la información indicada, radica el manejo del flujo editorial de la Revista. Los autores deben a través de esta plataforma incorporar sus contribuciones, recibir posibles sugerencias de correcciones y finalmente enterarse de la aceptación o eventual rechazo de estas.

Santiago Barros & Braulio Gutiérrez
Editores C&I Forestal
sbarros@infor.cl bguetierr@infor.cl



Publicado por Ciencia & Investigación Forestal bajo licencia CC-BY-NC 4.0



Las opiniones contenidas en esta revista son responsabilidad de los autores que las emiten y no representan necesariamente la posición institucional del Instituto Forestal.





CONTENIDO

ARTÍCULOS

- Modelado de la distribución potencial y efectos del cambio climático en *Porlieria chilensis* (guayacán) en la zona central de Chile.** 5
Marcelo Hernández Nauto.
CHILE

- Rigidez dinámica en compuestos lignocelulósicos de *Pinus pseudostrobus* aglutinados con proteína de trigo y aditivos minerales.** 29
Javier Sotomayor Castellanos, Sonia Correa Jurado & Kayo Kudo
MÉXICO

- Variabilidad de la calidad de la madera en pie de *Pinus* spp. en localidades de los Andes colombianos.** 39
Ricardo Oviedo Celis, Adriana Espinel Cuadros, Herwin Roa Caicedo &, Ronald Alfonso Montañez
COLOMBIA

APUNTES

- La apicultura como herramienta de desarrollo en pueblos originarios del sur de Chile.** 51
Andrea Álvarez Contreras, Xiomara Gélvez Peláez, Eduardo Molina Rademacher, Marta García Ortega & Patricio Chung Guin-Po
CHILE

- Sostenibilidad del abastecimiento de biomasa para pellet en Chile: estado actual, dependencias y proyecciones.** 63
Juan Carlos Pinilla Suárez, Joaquín García Inostroza, Karina Luengo Vergara, Felipe Navarrete Ulloa, Karoline Casanova del Río & Mauricio Navarrete Torres.
CHILE

- Caracterización de la oferta de viviendas prefabricadas en madera: brechas y desafíos para la política pública en la Región del Maule.** 81
Susana Benedetti Ruíz, Pamela Poblete Hernández & Cecilia Gallardo Lara.
CHILE

OPINIÓN

- El método Miyawaki, expectativa y realidad.** 97
Braulio Gutiérrez Caro.
CHILE



ARTÍCULO

Modelado de la distribución potencial y efectos del cambio climático en *Porlieria chilensis* (guayacán) en la zona central de Chile.

Marcelo Hernández Nauto^{1*} 

¹ Corporación Nacional Forestal, Gerencia de Fiscalización Forestal y Evaluación Ambiental, Dpto. Evaluación Ambiental. Santiago, Chile. marcelo.hernandez@conaf.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.661>

Recibido: 31.03.2026; Aceptado: 13.05.2026.

RESUMEN

Este estudio modeló la distribución potencial actual y futura de *Porlieria chilensis* (guayacán), especie endémica y vulnerable, en las provincias de Chacabuco y Santiago, Chile. La distribución potencial se estimó mediante el algoritmo Maxent, utilizando 85 puntos de ocurrencia y 19 variables bioclimáticas de *WorldClim*. Se analizaron diversos escenarios de cambio climático para el horizonte 2021-2040 con el fin de identificar las variables determinantes y proyectar variaciones en la idoneidad del hábitat. Las proyecciones futuras, periodo 2021-2040, se basaron en cuatro Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP126, 245, 370 y 585) del modelo de circulación general ACCESS-CM2. La robustez de los modelos se validó mediante el Área Bajo la Curva (AUC), mientras que la contribución de las variables climáticas se determinó mediante la prueba de *Jackknife*. Todos los modelos exhibieron una capacidad predictiva con valores de AUC superiores a 0,80. Los resultados revelan que la especie posee un nicho térmico estrecho, limitado principalmente por la temperatura máxima del mes más cálido (Bio5), con un umbral crítico de 31 °C, y el rango diurno promedio (Bio2). Las proyecciones indican una degradación sistemática del hábitat; el escenario SSP370 resultó ser el más crítico, con un aumento del 7,25 % en áreas inadecuadas y una pérdida del 15 % en hábitats moderadamente aptos. La crisis climática amenaza la estabilidad del guayacán, promoviendo la fragmentación del hábitat en parches aislados. Es imperativo implementar estrategias de conservación adaptativa, incluyendo la identificación de refugios climáticos, corredores biológicos y programas de migración asistida para mitigar el riesgo de extinción local.

Palabras clave: *Porlieria chilensis*, modelos de distribución de especies, cambio climático, idoneidad de hábitat, Maxent.

SUMMARY

This study aimed to model the current and future potential distribution of *Porlieria chilensis* (Guayacán), an endemic and vulnerable species, within the provinces of Chacabuco and Santiago, Chile. The research sought to identify the most significant bioclimatic variables for its presence and assess the impact of different climate change scenarios on habitat suitability for the 2021–2040 periods. The maximum entropy algorithm (Maxent) was employed, utilizing 85 georeferenced presence records and 19 bioclimatic variables from *WorldClim*. Future modeling integrated four Shared Socioeconomic Pathways (SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585) from the ACCESS-CM2 general circulation model. Model performance was evaluated using the Area Under the Curve (AUC), and variable contribution was determined through the Jackknife test. All models exhibited high predictive performance with AUC values exceeding 0.80. The species exhibits a narrow thermal niche, primarily constrained by the Max Temperature of Warmest Month (Bio5), with a critical threshold at 31 °C, and Mean Diurnal Range (Bio2). Future projections indicate systematic habitat degradation; the SSP370 scenario is the most severe, projecting a 7.25 % increase in unsuitable areas and a 15% loss of moderately suitable habitats. The climate crisis threatens the ecological stability of *P. chilensis*, driving habitat fragmentation into isolated patches. Urgent adaptive conservation strategies are required, including the identification of climatic refugia, the establishment of biological corridors, and the evaluation of assisted migration programs to mitigate the risk of local extinction.

Keywords: *Porlieria chilensis*, species distribution models, climate change, habitat suitability, Maxent.



INTRODUCCIÓN

El aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, que conduce a eventos climáticos extremos más frecuentes e intensifica aún más el impacto del cambio climático en los ecosistemas, es producto del acelerado desarrollo social (IPCC, 2014; Guo *et al.*, 2024). Eventos climáticos como temperaturas extremadamente altas y las sequías, que generan estrés abiótico y biótico, pueden perjudicar el crecimiento vegetal y la salud de los bosques (Kumar *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2024). Los cambios de temperatura y precipitación traídos por el cambio climático modifican los procesos fisiológicos de las plantas, afectando el crecimiento, desarrollo, reproducción, estabilidad y distribución geográfica (Wei *et al.*, 2024). El cambio climático ha impactado profundamente la distribución natural de las especies, la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas (Zhang *et al.* 2021; Guo *et al.*, 2024). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas estima que, si la temperatura promedio de la Tierra aumenta entre 2 y 3 °C, alrededor del 20 al 30 % de toda la biodiversidad terrestre estará en alto riesgo de extinción para fines de siglo (IPCC, 2014). En el último siglo, la temperatura de la tierra y el océano mostró un calentamiento de aproximadamente 1,0 °C, que puede aumentar otros 1,4 °C a 5,0 °C para 2100, si no reducimos las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019; Lima *et al.*, 2022). Por lo tanto, los cambios en las condiciones ambientales podrían alterar los procesos y respuestas fisiológicas de las especies, los procesos metabólicos, la fenología y la dispersión de semillas. Las plantas pueden responder adaptándose a las nuevas condiciones, o modificando, o reduciendo su área de distribución geográfica (Wei *et al.*, 2024). Muchos estudios revelan que el cambio climático es una causa importante de pérdida de biodiversidad (Koç *et al.*, 2024; Hosseini *et al.*, 2024), fragmentación del hábitat y cambios en los patrones espaciales de las especies; puede aumentar el riesgo de extinción de las especies en peligro de extinción (Shen *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2024; Hayat *et al.*, 2024), cuando se altera la idoneidad del hábitat de las especies (Lima *et al.*, 2022), puede alterar el comportamiento de los organismos, las interacciones entre especies, la estructura y funcionamiento de los ecosistemas y la distribución de las especies en el paisaje (Arroyo *et al.*, 2019). También ha influido en el crecimiento y la supervivencia de las especies vegetales, especialmente de aquellas con un nicho ecológico estrecho (Wei *et al.*, 2024). Provoca alteraciones que pueden afectar funciones como la captura del carbono y la cantidad almacenada en el suelo, los ciclos de nutrientes, la productividad, la polinización y la resistencia a los patógenos, entre otras (Prober *et al.*, 2012). Además, con cambios en la distribución de las especies, el cambio climático puede producir la transformación de los ecosistemas, lo que genera una alta incertidumbre con respecto a la disponibilidad y calidad de los servicios ecosistémicos a nivel local y global (Arroyo *et al.*, 2019). En consecuencia, el cambio climático ha traído impactos de gran alcance en los patrones de distribución de las especies vegetales en las últimas décadas, constituyendo una causa primaria de su declive y pérdida (Wei *et al.*, 2024). El cambio climático continúa debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la actualidad, y representa una amenaza para las plantas y afecta la estabilidad y función de los ecosistemas (Koç *et al.*, 2024).

Evaluar los impactos del cambio climático en el área de distribución y patrón espacial de especies amenazadas y en peligro de extinción es crucial para monitorear y restaurar poblaciones nativas en sus hábitats naturales. En la última década, el modelado de la distribución de especies se ha convertido en una herramienta analítica para la planificación de la conservación y la gestión de la biodiversidad (Wei *et al.*, 2024). Los modelos de distribución de especies (en adelante, MDE), también denominados modelos de nicho ecológico, son la herramienta metodológica más ampliamente utilizada para representar la distribución potencial de las especies a través del reconocimiento de las características específicas de cada una de estas (Elith & Leathwick, 2009; Benavides *et al.*, 2024; Guzmán-Santiago *et al.*, 2024; Guo *et al.*, 2024). Los MDE han mostrado la capacidad de reproducir la distribución potencial utilizando datos de ocurrencia de especies, en combinación con el uso de variables bioclimáticas correspondientes (Guisan & Zimmermann 2000; Wang *et al.*, 2024), para identificar sitios potencialmente adecuados para especies, tanto en rangos nativos como nuevos, y en diferentes escalas temporales (Franklin, 2013; Guisan *et al.*, 2013; Robinson *et al.*, 2017). Estos modelos, en conjunto con los de circulación general (MCG), pueden ser proyectados a futuro para entender los cambios en la distribución potencial de las especies (Jiménez-García & Peterson 2019; Guzmán-Santiago *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024); para evaluar su vulnerabilidad al cambio climático y adaptación ecológica; para promover el mantenimiento de la biodiversidad (Atwater *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2024; Qasim *et al.*, 2024); para investigar los impactos del cambio climático en la distribución de las especies; y para evaluar la idoneidad del hábitat (Hosseini *et al.*, 2024). Ellos han

presentado una gran aplicación en el ámbito de la conservación, evolución y manejo de especies invasoras, entre otros (Mateo *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2011; Zurell *et al.*, 2020).

Los MDE son en esencia representaciones cartográficas de especies o ecosistemas que contienen similares condiciones bióticas y abióticas en una zona geográfica que en la actualidad no está presente. Son, además, una relación estadística entre la categoría actual y las variables independientes usadas como indicadores, por ejemplo: topográficas, ecológicas, geológicas y/o climáticas de la zona de estudio. Sin embargo, poseen limitaciones espaciales y temporales, las que pueden variar año a año por acción antrópica o natural, por lo que dependerá de la toma de datos y el procesamiento para que los resultados sean lo más acertados a la realidad (Loyola, 2017).

Los algoritmos de modelado como BIOCLIM y GARP (Plasencia-Vázquez, 2022) o Maxent (Phillips *et al.*, 2017) han sido utilizados para evaluar el impacto en la distribución y permanencia de especies ante el cambio climático, a partir de variables climáticas y registros de presencia (Ledig *et al.*, 2010; Monterroso-Rivas *et al.*, 2013; Rodríguez-Ruiz *et al.*, 2024). El modelo de máxima entropía (Maxent) es un algoritmo especializado que se ha usado con frecuencia para predecir la idoneidad de hábitat actual y futura de especies de diversos grupos biológicos empleando registros de presencia-absencia (Phillips *et al.*, 2006; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). El conocimiento de la idoneidad de hábitat de especies forestales permite distinguir los diferentes patrones ambientales que contribuyen a su establecimiento, lo que favorece la obtención de información importante en actividades de conservación y gestión de recursos genéticos (Hernández-Ruiz *et al.*, 2016).

Poutay y Plissock (2023) en su informe “Modelo de distribución de especies en Chile: proyecciones futuras bajo escenario de riesgo climático” concluyen que, la flora de la zona central de Chile, específicamente entre las regiones de Coquimbo y Maule, enfrentará una reducción significativa en los escenarios futuros. Además, agregan que en el futuro existiría la probabilidad de un recambio de las especies que conforman los ecosistemas actuales en las zonas de mayor cambio en la adecuación o idoneidad climática, aumentando además el riesgo de extinción de las especies. Este riesgo sería mucho mayor en especies que tienen menor rango de distribución y especialmente en aquellas cuyo rango se circunscribe a las zonas con mayor cambio futuro.

Porlieria chilensis (guayacán) es un arbusto o árbol pequeño siempreverde de hasta 6 m de altura, endémico de Chile y declarado oficialmente como Vulnerable, se desarrolla en este rango de riesgo climático. Crece entre la IV Región (provincia de Elqui, 29°27'S) y la VI Región (provincia de Colchagua, 34°15'S), desde el nivel del mar hasta los 1.300 m de altitud (Hechenleitner *et al.*, 2005). Al respecto, los objetivos del presente estudio son: 1) desarrollar modelos de distribución predictiva y mapear hábitat óptimo de *Porlieria chilensis*, bajo un escenario potencial actual y bajo escenario de cambio climático, en dos provincias de la Región Metropolitana; y 2) identificar las variables bioclimáticas más relevantes vinculadas a la presencia de esta especie vulnerable.

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Estudio

El área de estudio comprende las provincias colindantes de Chacabuco (33°08'00" S y 70°46'00" O) y Santiago (33°25'00" S; 70°33'00" O), ambas situadas en la Región Metropolitana de Chile (Figura 1). La provincia de Chacabuco se ubica al norte de la región y está integrada por tres comunas, mientras que la provincia de Santiago alberga 32 comunas. El tipo forestal predominante en ambas unidades administrativas es el esclerófilo (Donoso, 1981). No obstante, la provincia de Chacabuco se destaca por poseer una superficie de este tipo forestal que triplica a la de Santiago y por registrar la presencia exclusiva de los tipos forestales palma chilena y roble-hualo (CONAF, 2024). Bajo la clasificación de la *Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile* (Luebert & Plissock, 2017), el área de estudio se circunscribe al piso vegetacional del matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior de *Quillaja saponaria* y *Porlieria chilensis*, ecosistema donde esta última especie alcanza su máxima relevancia fisionómica. El régimen climático predominante es el mediterráneo, caracterizado por un periodo seco prolongado.

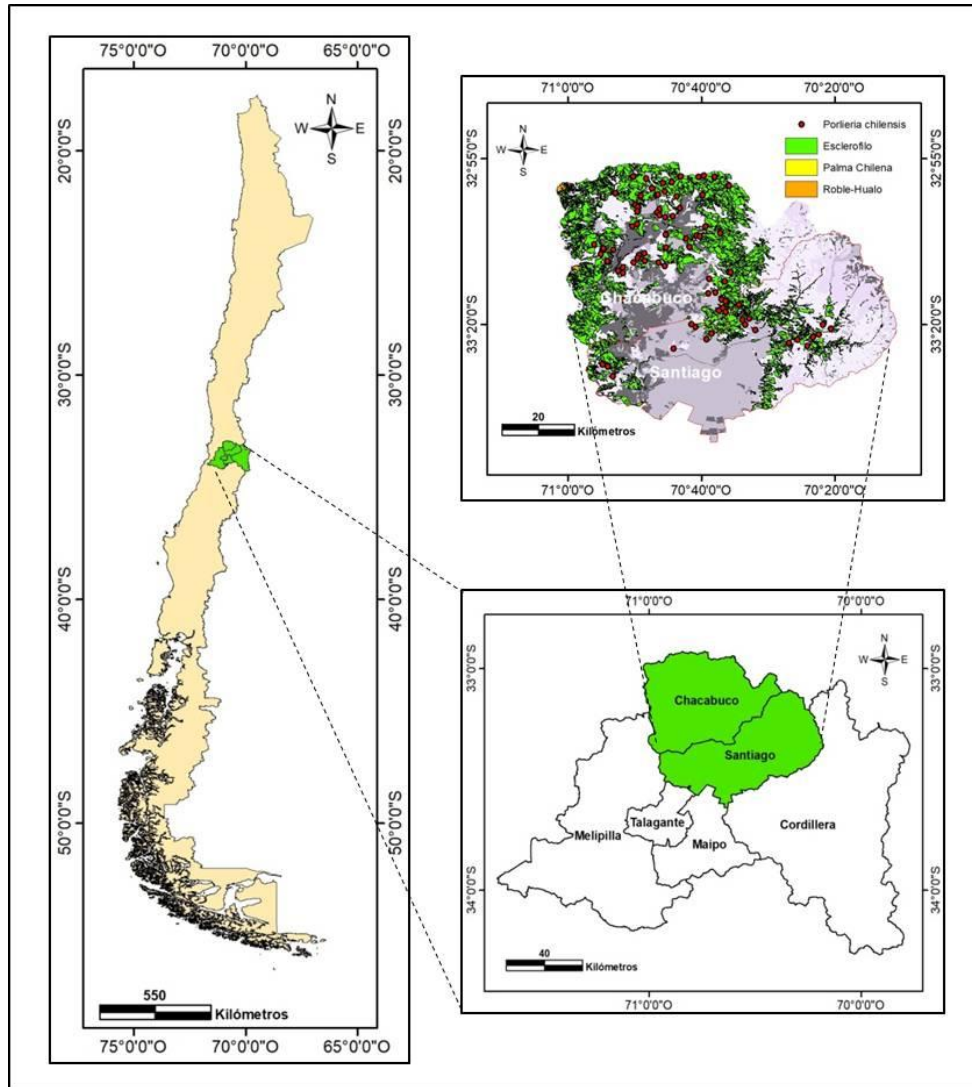


Figura 1. Área de estudio y registro de presencia de *Porlieria chilensis* en las provincias de Chacabuco y Santiago de la región Metropolitana de Chile.

Registros Geográficos de Presencia de *Porlieria chilensis*.

Para desarrollar los modelos, se seleccionó un conjunto de 85 registros geográficos de *Porlieria chilensis*, ubicados en áreas clasificadas como bosque y pradera-matorral, de acuerdo con la cartografía actualizada del *Informe Técnico de los Recursos Vegetacionales de la Región Metropolitana* (CONAF, 2024). Con el fin de reducir el sesgo espacial en la modelación, se aplicó un criterio de distanciamiento mínimo de un kilómetro entre cada registro. La selección final se obtuvo a partir de una base de datos compuesta por 1.500 registros de presencia en las provincias de Santiago y Chacabuco, construida mediante información técnica de proyectos evaluados por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y expedientes sectoriales ingresados a la Corporación Nacional Forestal (CONAF), bajo las solicitudes de excepcionalidad establecidas en el artículo 19 de la Ley N° 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal.

Variables Bioclimáticas Actuales y Futuras.

Se descargaron 19 capas actuales y futuras de variables bioclimáticas (**Cuadro 1**) del portal *WorldClim* versión 2.1¹, que ofrece datos climáticos máximos, mínimos y medias para valores de temperatura y precipitación para el periodo actual (1970-2000) (Fick y Hijmans, 2017), con una resolución espacial de 30 segundos (1 km²) para modelar la distribución potencial actual de *Porlieria chilensis*.

Para la modelación climática futura, se eligió el periodo de tiempo 2021-2040, bajo el escenario de cuatro Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*) (SSP): SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585, que representan la sostenibilidad, el equilibrio, la rivalidad regional y las vías de desarrollo basadas en combustibles fósiles, respectivamente (Fan *et al.*, 2020; Mao *et al.*, 2024). Estas trayectorias describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y representan, a partir de una narrativa y de variables cuantitativas, cómo podría evolucionar el mundo en las décadas siguientes, y qué desafíos suponen esos cambios para la mitigación y la adaptación (Escoto *et al.*, 2017; Ruiz-García *et al.*, 2022). Se derivaron las proyecciones climáticas futuras para el modelo de circulación general (MCG) ACCESS-CM2, con una resolución de 30 segundos, modelo correspondiente al conjunto de datos de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Los datos del CMIP6 constituyen los datos más actualizados y disponibles sobre modelos climáticos globales (Torres-Guasca, 2023).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas de datos actuales y futuros descargados de *WorldClim*, para la modelación de la distribución potencial de *Porlieria chilensis*.

Variable	Descripción
Bio1	Temperatura media anual
Bio2	Rango medio diurno (Media de la (max temp - min temp) mensual)
Bio3	Isotermicidad (BIO2/BIO7) (x 100)
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar x 100)
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio7	Rango anual de temperaturas (BIO5-BIO6)
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio12	Precipitación anual
Bio13	Precipitación del mes más húmedo
Bio14	Precipitación del mes más seco
Bio15	Estacionalidad de la precipitación
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio19	Precipitación del trimestre más frío

Selección de Variables Bioclimáticas.

Se extrajo la información climática de las 19 variables (**Cuadro 1**), correspondiente a los 85 puntos de presencia de *Porlieria chilensis*, considerando tanto el escenario actual como los proyectados. Dado que la correlación entre variables puede comprometer la uniformidad espacial y la capacidad predictiva de los modelos de distribución de especies (Gonçalves *et al.*, 2024), se evaluó la colinealidad mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) (Guzmán-Santiago *et al.*, 2024; Hayat *et al.*, 2024; Hosseini *et al.*, 2024).

¹ <https://www.worldclim.org/data/index.html>

Para mitigar los efectos de la multicolinealidad, se excluyó a aquellas variables con una correlación superior a 0,7 (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020; Merow *et al.*, 2013). Posteriormente, el conjunto inicial de 19 variables se integró en una construcción preliminar del modelo Maxent para determinar su importancia mediante la prueba de *Jackknife*. Esta prueba permitió identificar la contribución relativa de cada predictor y definir los requerimientos ambientales críticos para la subsistencia de la especie en las provincias de Chacabuco y Santiago (Ávila *et al.*, 2024). Finalmente, los modelos definitivos se construyeron utilizando únicamente las variables no correlacionadas que presentaron el mayor aporte al desempeño del modelo (Ávila *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2021; Tarnian *et al.*, 2021).

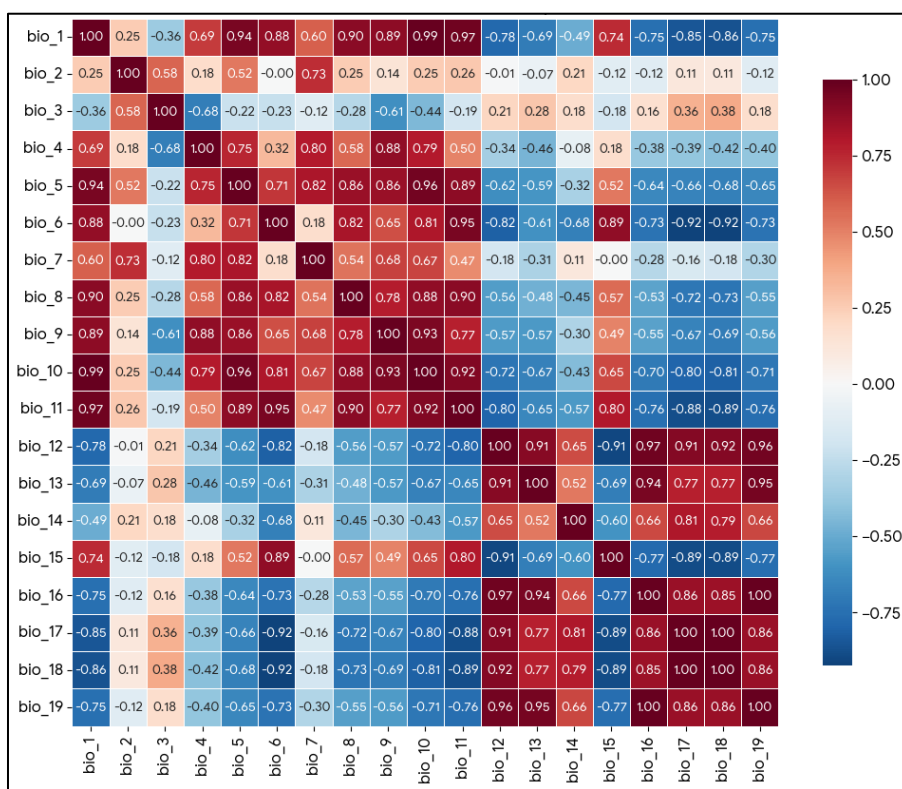


Figura 2. Matriz de correlación de Pearson (r) de las 19 variables predictoras. Las correlaciones negativas se muestran en color azul, las positivas se muestran en rojo. La intensidad del color representa la magnitud de los coeficientes de correlación.

Modelación de la Distribución Potencial Actual y Futura

Se desarrollaron modelos de distribución potencial para determinar la idoneidad del hábitat de *Porlieria chilensis*. Estos modelos se construyeron utilizando observaciones de terreno y variables bioclimáticas como predictores de áreas geográficas adecuadas (Alverdi, 2020). Se empleó el software Maxent versión 3.4.4, basado en el principio de máxima entropía, para estimar la distribución potencial actual y futura de la especie. Este algoritmo fue seleccionado por su alta precisión en predicciones geográficas utilizando exclusivamente registros de presencia y por su robustez en el procesamiento de muestras pequeñas (Elith *et al.*, 2006; Bambach *et al.*, 2013; García *et al.*, 2013; Marcer *et al.*, 2013; Brouwer, 2020; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020) (West *et al.*, 2016).

Para la ejecución de los modelos, las variables bioclimáticas se integraron con los registros de presencia, los cuales se dividieron aleatoriamente en un 75 % para entrenamiento y un 25 % para validación. Se aplicaron los parámetros predeterminados del programa, incluyendo una regularización múltiple de 1, un máximo de 10,000 puntos de fondo, 500 iteraciones, un umbral de convergencia de 0,00001 y una

prevalencia por defecto de 0,5. El tipo de ejecución de réplicas se configuró mediante validación cruzada y la salida del modelo fue de tipo logística. Para el modelo actual, se utilizaron las variables Bio5, Bio8, Bio12, Bio13 y Bio17. Los predictores para los escenarios de cambio climático se detallan en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Variables bioclimáticas seleccionadas bajo escenario de cambio climático de cuatro trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) durante el periodo 2021-2040.

Trayectoria socioeconómica compartida (SSP)	Variable
SSP126	Bio2, Bio5, Bio7, Bio9, Bio11, Bio12 y Bio13
SSP245	Bio2, Bio8, Bio9, Bio12 y Bio13
SPP370	Bio2, Bio7, Bio9, Bio11 Bio14, Bio15 y Bio19
SSP585	Bio1, Bio2, Bio9, Bio12 Bio13, Bio17 y Bio19

Evaluación de los Modelos

Para validar el desempeño de las predicciones actuales y futuras, se utilizó el estadístico Área Bajo la Curva (AUC), derivado del análisis de la Curva Característica Operativa del Receptor (ROC) (Phillips *et al.*, 2006; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020; Medina *et al.*, 2021; Ávila *et al.*, 2024). El AUC proporciona una métrica entre 0 y 1 para medir la capacidad predictiva del modelo: valores inferiores a 0,5 sugieren un rendimiento similar al azar; entre 0,7 y 0,9 indican un desempeño bueno, mientras que valores superiores a 0,9 califican el modelo como excelente (Mateo *et al.*, 2011; Damaneh *et al.*, 2022; Osorto, 2022; Ávila *et al.*, 2024; Hayat *et al.*, 2024). Un AUC más elevado refleja una mayor probabilidad de que el modelo asigne correctamente valores de idoneidad superiores a sitios de presencia real frente a puntos aleatorios.

Complementariamente, se aplicó la prueba de *Jackknife* no solo para cuantificar la contribución individual y relativa de las variables ambientales en la generación de los modelos, sino también para identificar aquellos que poseen información única y no redundante (Phillips *et al.*, 2006). Esta prueba permite evaluar la relevancia de los predictores mediante tres indicadores gráficos clave: la barra azul cuantifica la capacidad predictiva de una variable al actuar de forma aislada, la barra turquesa señala la pérdida de ganancia al omitirla (donde una menor longitud revela información esencial e irremplazable) y la barra roja determina la ganancia total del modelo al integrar todas las variables.

Modelos de Distribución Potencial Actual y Bajo Escenario de Cambio Climático

Los mapas de idoneidad de hábitat se generaron mediante el modelo logístico de Maxent, el cual produce una cuadrícula de salida que facilita su integración y análisis en sistemas de información geográfica (Phillips y Dudík, 2008; Quesada-Quiroz *et al.*, 2016). El resultado constituye una función exponencial que describe la probabilidad de distribución sobre la región de estudio, coincidiendo con el nicho fundamental de la especie. Esta probabilidad se expresa en una escala de 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 indican áreas no idóneas y los cercanos a 1 representan una alta probabilidad de ocurrencia o áreas idóneas o adecuadas para la especie (Fuentes *et al.*, 2019; Vaca *et al.*, 2021; Torres-Guasca, 2023; Ávila *et al.*, 2024).

Los archivos en formato ASCII generados por el algoritmo fueron procesados en ArcGIS v. 10.2.2. v. 10.2 (ESRI, 2014). Para la edición y generación de modelos binarios (presencia-ausencia), se empleó el umbral de presencia *Maximum training sensitivity plus specificity*. La aplicación de este umbral permite una distinción estadística clara entre las zonas adecuadas y no adecuadas para la especie. Finalmente, los mapas resultantes fueron reclasificados en cuatro niveles (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Niveles de área de hábitat adecuado para *Porlieria chilensis*.

Valor	Significado
0,00 – 0,25	Hábitat inadecuado
0,25 – 0,50	Hábitat poco adecuado
0,50 – 0,75	Hábitat moderadamente adecuado
0,75 – 1,00	Hábitat muy adecuado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del Rendimiento del Modelo de Distribución Potencial Actual y Modelos Futuros

Con el fin de validar la suficiencia de los datos de presencia de *Porlieria chilensis* y corroborar la robustez estadística de las modelaciones, se evaluó la capacidad predictiva mediante el análisis del Área Bajo la Curva (AUC) de las Características Operativas del Receptor (ROC). El modelo de distribución potencial actual presentó un ajuste óptimo a los datos de entrada, como se observa en la **Figura 3**.

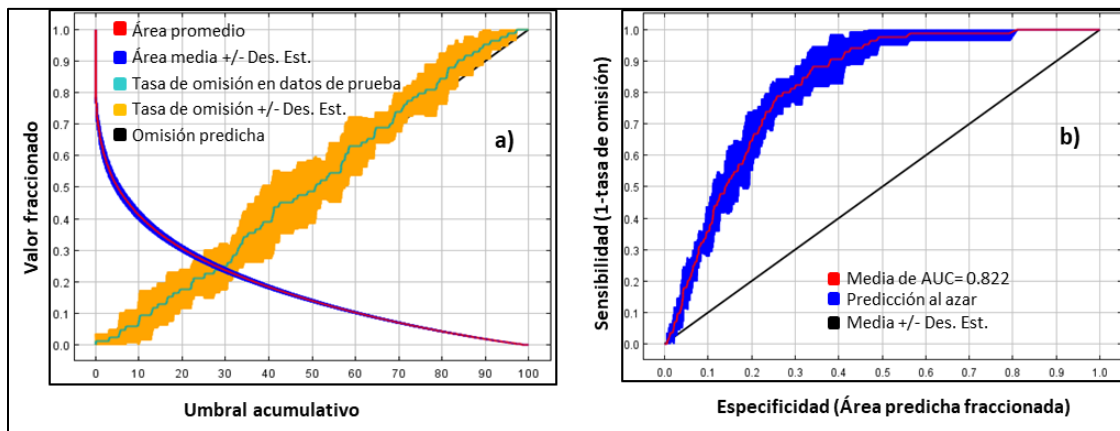


Figura 3. Tasa de omisión y área predicha (a) y curva ROC (*Receiver operating characteristic*) y valor UAC (área bajo la curva) (b) para el modelo de distribución potencial actual, generado por Maxent para *Porlieria chilensis*.

En la **Figura 3a**, la línea turquesa representa la variación de la tasa de omisión en los datos de prueba, la cual indica el porcentaje de registros de presencia real que el modelo no logró predecir. La estrecha correspondencia entre la omisión observada (línea turquesa) y la omisión predicha (línea negra) confirma que el modelo es consistente con la predicción teórica y no subestima el hábitat de *P. chilensis*. Asimismo, el rápido descenso de la línea roja (área predicha) sugiere que el algoritmo discrimina eficazmente áreas específicas de idoneidad en lugar de generalizar la distribución en todo el territorio.

De acuerdo con la **Figura 3b**, el modelo actual alcanzó un AUC promedio de 0,822 ($\pm 0,026$), lo que califica su desempeño como alto. Este valor implica una probabilidad del 82,2 % de que el modelo asigne una mayor idoneidad a un punto de presencia real que a uno generado aleatoriamente (Tesfamariam *et al.*, 2022). En este contexto, la sensibilidad representa la proporción de localidades de prueba correctamente predichas, mientras que el área predicha fraccional (1 - especificidad) indica la proporción de píxeles con condiciones adecuadas para la especie (Phillips *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2017; Tesfamariam *et al.*, 2022). Estos resultados coinciden con los estándares de desempeño reportados en la literatura especializada (Phillips *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2017; Damaneh *et al.*, 2022; Osorto, 2022; Tesfamariam *et al.*, 2022; Ávila *et al.*, 2024; Hayat *et al.*, 2024).

Respecto a las proyecciones para el periodo 2021-2040 (**Figura 4**), todos los escenarios futuros exhibieron una buena capacidad predictiva, con valores de AUC superiores a 0,80: a) SSP126 ($0,808 \pm 0,024$), b) SSP245 ($0,809 \pm 0,060$), c) SSP370 ($0,816 \pm 0,039$) y d) SSP585 ($0,822 \pm 0,032$). La baja desviación estándar observada en estas réplicas confirma la estabilidad de los modelos, asegurando que los resultados son consistentes frente a variaciones en la ejecución del algoritmo.

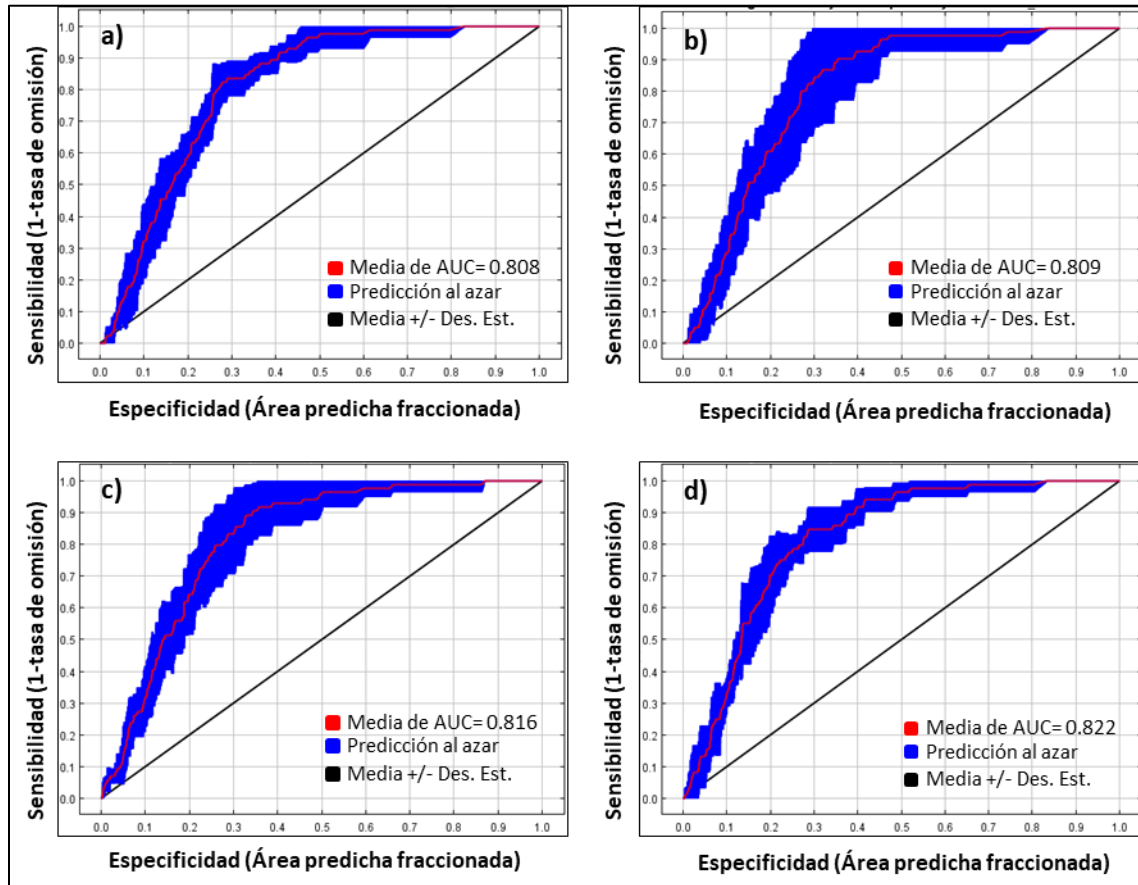


Figura 4. Curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) para los modelos futuros, período 2021-2040, generados por Maxent para *Porlieria chilensis*: a) Modelo SSP126; b) Modelo SSP245; c) Modelo SPP370 y d) Modelo SSP585.

Análisis de las Principales Variables Bioclimáticas Predictivas que Determinan la Distribución de *Porlieria chilensis*.

El software Maxent cuantifica la importancia de los predictores ambientales mediante su contribución porcentual, un indicador que determina el peso relativo de cada variable en la configuración del modelo. En el **Cuadro 4** se detallan estos porcentajes junto con la importancia de permutación para las condiciones actuales y los cuatro escenarios futuros proyectados para el periodo 2021-2040.

En el modelo de distribución potencial actual, las variables con mayor influencia sobre la ocurrencia de *P. chilensis* son la temperatura máxima del mes más cálido (Bio5), con una contribución del 48,5 %, seguida de la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio8), aportando un 23,1 % y la precipitación del trimestre más seco (Bio17), con un 17,9 %. Estas tres variables explican en conjunto el 89,5 % del modelo. Es relevante destacar que, aunque Bio5 lidera la contribución, Bio8 presenta la mayor importancia de permutación (40,9 %) y la mayor ganancia individual en la prueba de *Jackknife* (**Figura 5a**). Esto implica

que el éxito predictivo del modelo depende críticamente de Bio8; su eliminación reduciría el rendimiento en un 49,9 %. La relevancia de Bio5 y Bio8 sugiere que el guayacán está limitado por umbrales térmicos, vinculados a su resistencia al calor extremo estival y su metabolismo durante el periodo de mayor disponibilidad hídrica (trimestre más húmedo).

Bio17 aporta información única e insustituible (**Figura 5a**, barra turquesa más corta) sobre la supervivencia de guayacán, que las temperaturas no pueden explicar. El modelo se ve muy afectado al eliminar Bio17, variable que actúa como un factor crítico que refleja la capacidad de la especie para sobrevivir a la sequía prolongada, característica propia del clima mediterráneo y semiárido de Chile (*Santibáñez et al., 2013, Luebert & Plischoff, 2017*). Los bajos aportes de la precipitación anual (Bio12, 4,7 %) frente a la estacionalidad (Bio13, 5,7 %) sugieren que para esta especie es más relevante la distribución temporal de la precipitación que el total acumulado.

Cuadro 4. Contribución porcentual e importancia de permutación de las variables bioclimáticas en la predicción de los modelos de distribución potencial actual y futuros, en un escenario de cambio climático para *Porlieria chilensis*.

Variable	(Contribución porcentual %; Importancia de Permutación %)				
	Actual	SSP126	SSP245	SSP370	SSP585
Bio1	-	-	-	-	(27,2; 39,2)
Bio2	-	(39,4; 7,6)	(50,3; 16,3)	(39,2; 25,4)	(34,7; 4,9)
Bio5	(48,5; 15,2)	(3,9; 10,5)	-	-	-
Bio7	-	(12,8; 5,5)	-	(8,7; 0,0)	-
Bio8	(23,1, 40,9)	-	(20,8; 14,3)	-	-
Bio9	-	(15,4; 47,6)	(19,9; 23,8)	(11,0; 9,5)	(11,9; 15,2)
Bio11	-	(19,5; 1,0)	-	(14,9; 26,6)	-
Bio12	(4,7; 13,8)	(7,5; 19,1)	(6,9; 25,9)	-	(0,9; 5,5)
Bio13	(5,7; 3,2)	(1,5; 8,6)	(2,2; 19,7)	-	(3,0; 9,6)
Bio14	-	-	-	(8,0; 21,0)	-
Bio15	-	-	-	(3,5; 5,2)	-
Bio17	(17,9; 3,2)	-	-	-	(5,6; 15,2)
Bio19	-	-	-	(14,7; 12,3)	(16,7; 10,4)

En los escenarios futuros (SSP245, SSP370 y SSP585), la importancia de las variables se desplaza hacia la oscilación térmica. El rango medio diurno (Bio2) se convierte en la variable predictora dominante. Este cambio indica una alta sensibilidad de *P. chilensis* a las fluctuaciones térmicas diarias típicas de los valles interiores.

Para el escenario SSP126, las variables Bio2 (39,4 %) y Bio11 (19,5 %) lideran la contribución. Sin embargo, la temperatura media del trimestre más seco (Bio9) posee la mayor importancia de permutación (47,6 %), aportando información única que no puede ser reemplazada por otros predictores; lo que indica que, si se elimina el efecto de la temperatura del trimestre más seco, el modelo pierde mucha precisión (**Cuadro 4**). El rango diurno promedio (Bio2) (**Figura 5b**) destaca por ofrecer la mayor ganancia aislada. Sin embargo, la temperatura media del trimestre más seco (Bio9) posee la mayor importancia de permutación y contiene información estructural única que, de ser eliminada, reduce significativamente la capacidad predictiva del modelo (**Figura 5b**). Esta información sugiere que la distribución de *Porlieria chilensis* está fuertemente determinada por la oscilación diaria (Bio2) y las condiciones térmicas durante el periodo de mayor aridez (Bio9), lo que resulta coherente con su ecología como especie adaptada a ambientes mediterráneos y semiáridos de Chile Central (*Santibáñez et al., 2013*).

En el escenario SSP245, Bio2 domina con un 50,3 % de contribución, lo que refleja que la especie está fuertemente vinculada a climas con oscilaciones térmicas diarias específicas, típicas de las zonas mediterráneas y semiáridas de Chile (*Santibáñez et al., 2013*). No obstante, la precipitación anual (Bio12) registra la mayor importancia de permutación (25,9 %), evidenciando que el modelo es extremadamente sensible a cambios en los regímenes de lluvia a largo plazo, lo que sugiere que el modelo es

extremadamente sensible a los cambios de lluvia anual. Si el régimen de lluvias cambia (por ejemplo, cambio climático), el área de distribución de *P. chilensis* se verá severamente alterada. Nuevamente, Bio2 se posiciona como el predictor más potente de forma aislada (**Figura 5c**). En este escenario, la omisión de Bio9 (barra turquesa más corta) y de la precipitación anual (Bio12) reduce la ganancia del modelo, lo que sugiere que ambos factores contienen información hidrotérmica esencial para la persistencia de la especie.

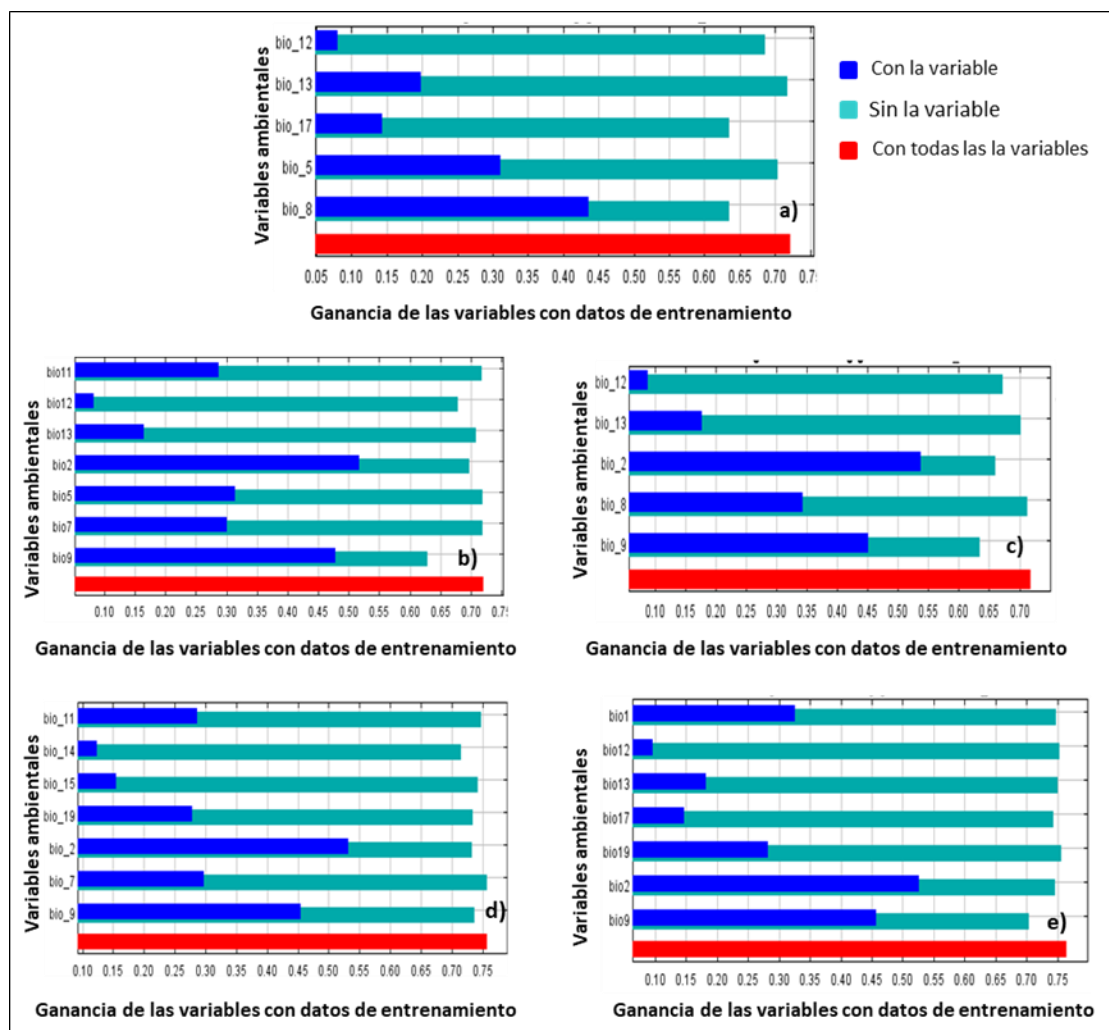


Figura 5. Análisis de la prueba de *Jackknife* de la contribución de cada variable a la ganancia de entrenamiento regularizada para *Porlieria chilensis*: **a)** Modelo de distribución potencial actual; **b)** Modelo SSP126; **c)** Modelo SSP245; **d)** Modelo SPP370 y **e)** Modelo SSP585. Las barras color azul oscuro indican la ganancia obtenida al usar cada variable de forma aislada; las barras turquesa indican la ganancia obtenida al eliminar la variable individual del modelo completo; las barras rojas indica la ganancia obtenida al usar todas las variables.

Bajo el escenario SSP370, Bio2 mantiene su relevancia (39,2 %), pero la temperatura media del trimestre más frío (Bio11) presenta la mayor importancia de permutación (26,6 %) (**Cuadro 4**). Bio2 continúa siendo la variable con mayor información útil por sí sola (**Figura 5d**). No obstante, la precipitación del mes más seco (Bio14) es el factor que más disminuye la ganancia al ser omitido, y tiene la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables, aportando matices únicos sobre el estrés hídrico que no están presentes en el resto de los predictores. Bio2 es el factor determinante; la especie responde fuertemente a la oscilación de temperatura; Bio9 viene a ser el factor crítico, al definir la supervivencia del

periodo de mayor estrés; y Bio11, factor secundario, relevante para definir límites por heladas o frío. El modelo de *Porlieria chilensis* está dominado principalmente por variables de temperatura (especialmente la oscilación térmica diaria y las temperaturas en periodos secos). Esto sugiere que la especie es muy sensible a los extremos térmicos del clima mediterráneo chileno (Santibáñez *et al.*, 2013; Luebert y Plissock, 2017).

En el escenario extremo SSP585, Bio2 (34,7 %) y Bio1 (27,2 %) son los principales contribuyentes y las que más ayudan a definir la ganancia inicial (**Cuadro 4**). La temperatura media anual (Bio1) adquiere la mayor importancia de permutación (39,2 %), sugiriendo que, bajo un desarrollo basado en combustibles fósiles, los límites térmicos globales condicionarán drásticamente la persistencia de la especie. Bio9 y Bio17 presentan una importancia de permutación idéntica (15,2 %), lo que sugiere que las condiciones extremas del trimestre más seco (tanto térmicas como hídricas) son determinantes para mantener la integridad del modelo (**Cuadro 4**). La importancia de las variables del trimestre más seco (Bio9 y Bio17) confirma que la especie está fuertemente limitada por el estrés hídrico y térmico estival, un rasgo característico del bosque y matorral esclerófilo.

En el escenario de mayores emisiones, Bio2 (rango medio diario) se mantiene como el predictor individual más fuerte (**Figura 5e**) y que contiene la información más útil, por sí solo, para identificar el nicho ecológico de la especie; es la variable más potente de forma individual para predecir la presencia de *P. chilensis*. Sin embargo, la variable que más disminuye la ganancia y el AUC cuando se omite es Bio9 (temperatura media del trimestre más seco), ella emerge como la limitante crítica del modelo, poseyendo información crucial e irremplazable sobre la supervivencia de la especie ante el estrés térmico e hídrico estival.

En conjunto, estos resultados confirman que *P. chilensis* está adaptada a regímenes con marcadas oscilaciones térmicas, entre el día y la noche, y que su distribución está condicionada por factores críticos de estrés durante los periodos más secos del año, típicos de las zonas semiáridas, valles de interiores y zonas mediterráneas de Chile (Santibáñez *et al.*, 2013).

El análisis de las curvas de respuesta (**Figura 6**) permite profundizar en la caracterización del nicho ecológico de *Porlieria chilensis*, identificando los umbrales fisiológicos y climáticos que limitan su idoneidad de hábitat bajo condiciones actuales y escenarios futuros (Mao *et al.*, 2024). La **Figura 6** sistematiza la respuesta de la especie ante los factores climáticos determinantes, empleando una escala logística de idoneidad desde condiciones marginales (0) hasta óptimas (1). La robustez del modelamiento se evidencia mediante el promedio de las réplicas y su respectiva desviación estándar, reflejando la dinámica de las áreas potencialmente adecuadas frente al cambio climático.

El modelo actual revela una especialización térmica marcada, particularmente en relación con los extremos estacionales de verano e invierno. La idoneidad aumenta exponencialmente con la temperatura máxima del mes más cálido (Bio5), alcanzando su pico óptimo a los 30 °C. No obstante, existe un umbral crítico de tolerancia muy estricto: a partir de los 31 °C, la probabilidad de presencia cae drásticamente hacia la nulidad, lo que sugiere un alto riesgo fisiológico ante eventos de calor extremo (**Figura 6a**). Respecto al periodo invernal, la especie requiere temperaturas moderadas durante el trimestre más húmedo (Bio8) para su establecimiento. La idoneidad es máxima entre los 9 °C y 10 °C, volviéndose nula en condiciones de congelación (0 °C), lo que posiciona al frío excesivo como un factor restrictivo clave (**Figura 6b**).

Un patrón consistente en todos los escenarios futuros (SSP126, 245, 370 y 585) es la fuerte dependencia de la especie respecto al rango diario de temperatura (Bio2). La idoneidad máxima se concentra en el intervalo de 14 °C a 15,5 °C de oscilación térmica diaria. Existe una correlación positiva donde, a mayor diferencia térmica entre el día y la noche, mayor es la probabilidad de ocurrencia, lo que ratifica la adaptación evolutiva de *P. chilensis* a los ecosistemas mediterráneos y semiáridos de interior de Chile central (Santibáñez *et al.*, 2013).

Bajo los escenarios SSP126 y SSP370, la respuesta a la temperatura del trimestre más frío (Bio11) muestra una preferencia por inviernos templados, con un óptimo cercano a los 10 °C (**Figuras 6d y 6h**). No obstante, el modelo SSP370 revela una meseta, de baja probabilidad constante, que se extiende hasta los -13 °C,

sugiriendo que *P. chilensis* posee mecanismos fisiológicos para tolerar eventos de heladas severas, aunque estos no representen condiciones óptimas para su desarrollo.

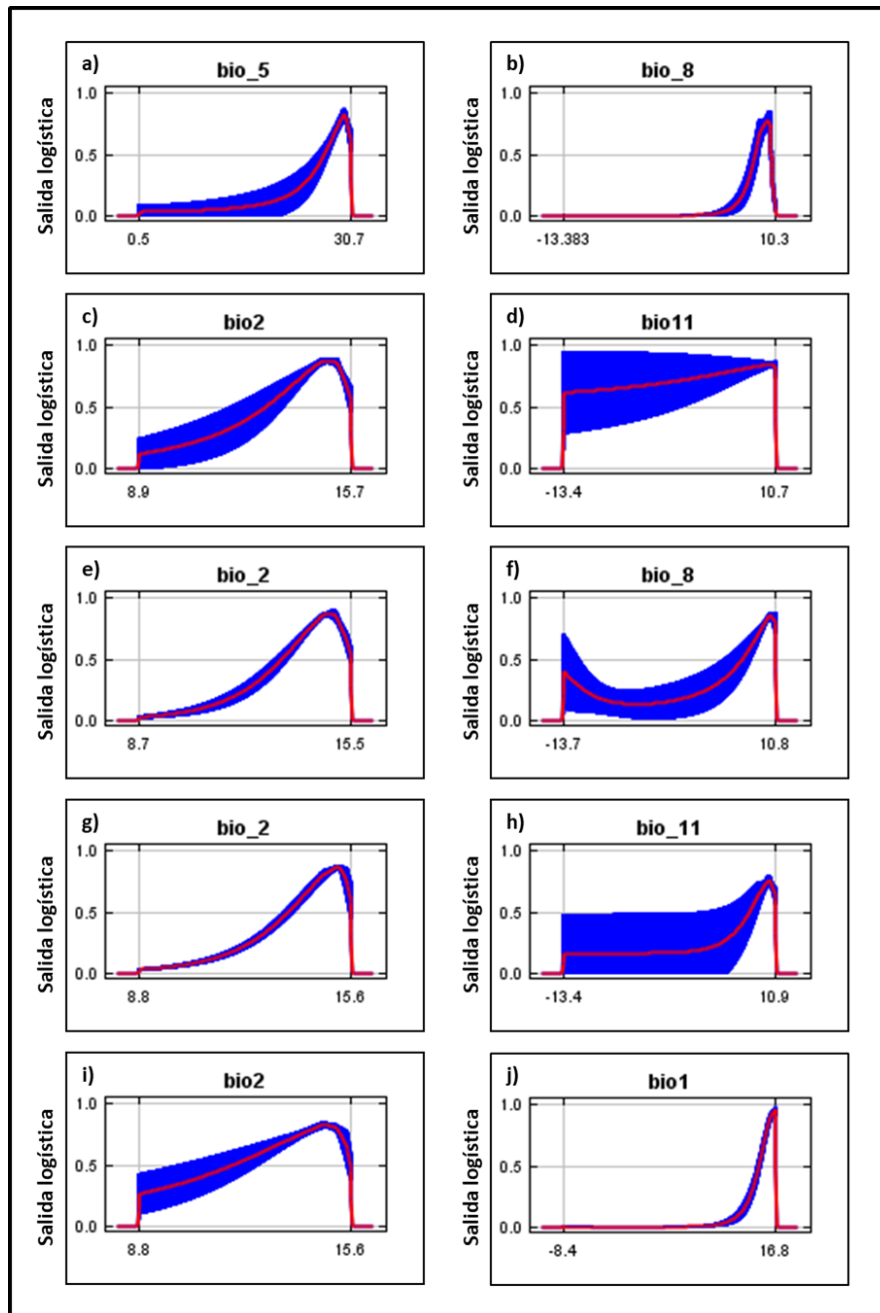


Figura 6. Curvas de respuestas individuales de los principales predictores ambientales de cada modelo: distribución potencial actual (a, b); SSP126 (c, d); SSP245 (e, f); SSP370 (g, h); SSP585 (i, j).

Bajo el escenario de desarrollo basado en combustibles fósiles (SSP585), la especie exhibe una especialización térmica restrictiva. Respecto al rango diurno promedio (Bio2), la mayor idoneidad de hábitat se observa entre los 14 °C y 15 °C (**Figura 6i**); la correlación positiva entre la probabilidad de ocurrencia y la amplitud térmica sugiere una adaptación preferencial a entornos con marcadas oscilaciones térmicas,

típicas de los ecosistemas mediterráneos y semiáridos de Chile (Santibáñez *et al.*, 2013). En cuanto a la temperatura media anual (Bio1), la probabilidad de presencia es nula por debajo de los 10 °C y presenta un incremento exponencial a partir de los 12 °C, alcanzando un óptimo cercano a 1.0 en los 17 °C (Figura 6j). La caída abrupta de la idoneidad inmediatamente después de dicho máximo, evidencia un nicho térmico estrecho y una baja resiliencia ante el incremento de las temperaturas medias por sobre este límite. En síntesis, el modelo predice que la persistencia de *P. chilensis* está condicionada a regímenes de alta oscilación térmica y temperaturas medias moderadas, quedando excluida de ambientes con frío persistente o calor extremo.

Los resultados del modelamiento concuerdan con la descripción fitogeográfica de la especie. *Porlieria chilensis* es un componente estructural del piso vegetacional correspondiente al matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior de *Quillaja saponaria* y *P. chilensis* (Luebert & Plischoff, 2017), integrando lo que Donoso (1981) define como el tipo forestal esclerófilo. Su distribución se restringe a zonas bajo la influencia de un clima mediterráneo, caracterizado por un régimen térmico de veranos calurosos con temperaturas máximas que superan frecuentemente los 30 °C e inviernos moderados con heladas ocasionales en los fondos de valle (Luebert & Plischoff, 2017).

De acuerdo con Santibáñez *et al.* (2013), la zona de estudio se sitúa bajo un régimen semiárido. En este entorno, la aridez se manifiesta a través de una prolongada estación estival seca y una fuerte concentración de precipitaciones en los meses de invierno (junio-agosto), con valores que oscilan entre los 250 y 450 mm anuales. No obstante, la extrema variabilidad interanual de las lluvias y la diferencia en los periodos de receso vegetativo entre la costa y el interior (1 a 3 meses más largo en el interior, según Santibáñez *et al.*, 2013) imponen desafíos fisiológicos significativos que explican la sensibilidad de la especie a las variables térmicas y de precipitación identificadas en los modelos de este estudio.

A pesar de la relevancia ecológica del guayacán, existe una preocupante escasez de literatura específica sobre los efectos del cambio climático en su distribución espacial. No obstante, las proyecciones disponibles coinciden en la gravedad del escenario futuro. Loaiza *et al.* (s.f.) estiman una reducción drástica de hasta el 60 % de su nicho potencial para el año 2050, descenso atribuido directamente a las sequías prolongadas que caracterizan las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP).

El fenómeno de la sequía no es aislado, sino que se inserta en una crisis sistémica del bosque esclerófilo en Chile central. Loyola (2017) sostiene que la distribución actual de estas formaciones está siendo severamente reconfigurada por el estrés hídrico acumulado. El impacto fisiológico de esta alteración ha sido subrayado por Miranda *et al.* (2020), quienes advierten que la perturbación en los patrones de temperatura y precipitación induce una caída en la productividad fotosintética, actuando como un precursor crítico de la mortalidad arbórea. Evidencia de este deterioro es el fenómeno del "pardeamiento" o "browning" reportado por CONAF (2025), que señala una degradación ecológica y alteraciones fenológicas profundas en el bosque nativo.

La vulnerabilidad de la flora se intensifica geográficamente entre las regiones de Coquimbo y Maule. Poutay y Plischoff (2023) señalan una disminución crítica en la adecuación climática de las especies de esta zona, mientras que Plischoff (2023) concluye que el forzamiento climático obligará a una reorganización total de los ecosistemas terrestres del país. La gravedad de esta transición es cuantificada por Cueto *et al.* (2025), quienes postulan que el bosque mediterráneo chileno se encuentra al borde del colapso, con un declive del vigor en el 90,9 % de las masas forestales y una reducción de la cobertura del dosel en un tercio de su superficie total.

En síntesis, la convergencia entre los resultados de este modelamiento y la literatura científica consultada sugiere que *P. chilensis* enfrenta un riesgo de extinción funcional en gran parte de su rango actual. Sin intervenciones de conservación urgentes y una gestión territorial que considere los umbrales críticos de temperatura aquí identificados, la viabilidad a largo plazo de la especie y los servicios ecosistémicos asociados al bosque mediterráneo interior están seriamente comprometidos.

Mapas de Predicción de la Distribución de Especies y la Idoneidad de Hábitat en las Condiciones Actuales y Futuras

El modelamiento de la idoneidad de hábitat para *Porlieria chilensis* permite proyectar la distribución espacial de la especie bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. La **Figura 7** ilustra las variaciones geográficas para el periodo 2021–2040, utilizando el modelo de circulación global ACCESS-CM2 bajo cuatro Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), mientras que en el **Cuadro 5** se cuantifican las superficies asociadas a cada nivel de idoneidad.

Los resultados revelan una tendencia sistemática hacia la degradación del nicho ecológico de *P. chilensis* en todos los escenarios evaluados. Si bien la distribución actual muestra núcleos consolidados de alta idoneidad de hábitat “Muy adecuado” y “Moderadamente adecuado” (**Figura 7a**), las proyecciones indican una transición crítica hacia estados de menor calidad ambiental (**Cuadro 5**).

Un hallazgo fundamental es el incremento constante de la categoría “Inadecuado” (color azul, **Figura 7**). En el escenario SSP370, esta superficie se expande a 246.534,54 ha, lo que representa un aumento del 7,25 % (16.673 ha) respecto al presente. Este fenómeno sugiere una homogeneización del paisaje hacia condiciones desfavorables, reduciendo drásticamente las probabilidades de establecimiento y supervivencia de la especie. Paralelamente, la categoría “Moderadamente adecuado” presenta la mayor contracción relativa, con una pérdida cercana al 15 % (10.561 ha) bajo el escenario SSP370 (**Cuadro 5**). Dado que esta categoría funciona habitualmente como zona de amortiguamiento y conectividad, su reducción fragmenta los núcleos de alta idoneidad, transformando un hábitat previamente continuo en parches aislados rodeados por una matriz adversa.

Aunque los escenarios moderados (SSP126 y SSP245) presentan un ligero incremento inicial en las áreas “Muy adecuadas” (2,98 % y 8,07 %, respectivamente), este comportamiento debe interpretarse con cautela. Es probable que represente una concentración de refugios en zonas de mayor altitud o latitud, más que una expansión real del rango. Esta hipótesis se confirma al observar el escenario extremo SSP585, donde las áreas óptimas comienzan a retraerse (1,02 %), indicando que se ha superado el umbral de resiliencia climática de la especie. Al comparar los mapas del escenario actual con los futuros (**Figura 7**), se nota que, aunque los parches de hábitat “Muy adecuados” (color rojo) pueden persistir o concentrarse, quedan rodeados por una matriz creciente de baja idoneidad o “Inadecuados” (color azul). Esto aumenta el riesgo de aislamiento de las poblaciones y reduce la conectividad entre los núcleos de distribución.

El modelo SSP370 se perfila como el más perjudicial, al combinar la mayor expansión de áreas no aptas con la mayor pérdida de hábitats moderados, lo que podría traducirse en una contracción severa del rango de distribución y un aumento de la vulnerabilidad biológica local.

Cuadro 5. Superficie de hábitat adecuado para la especie *Porlieria chilensis* de modelos de idoneidad de hábitat potencial actual y modelos para escenarios de emisiones futuros (SSP).

Tipo de hábitat	Actual (ha)	SSP126 (ha)	SSP245 (ha)	SSP370 (ha)	SSP585 (ha)
Inadecuado	229.862	233.155	234.584	246.535	238.799
Poco adecuado	66.618	65.457	63.885	59.970	67.353
Moderadamente adecuado	70.772	67.390	67.249	60.211	62.497
Muy adecuado	43.098	44.382	46.575	44.796	42.657

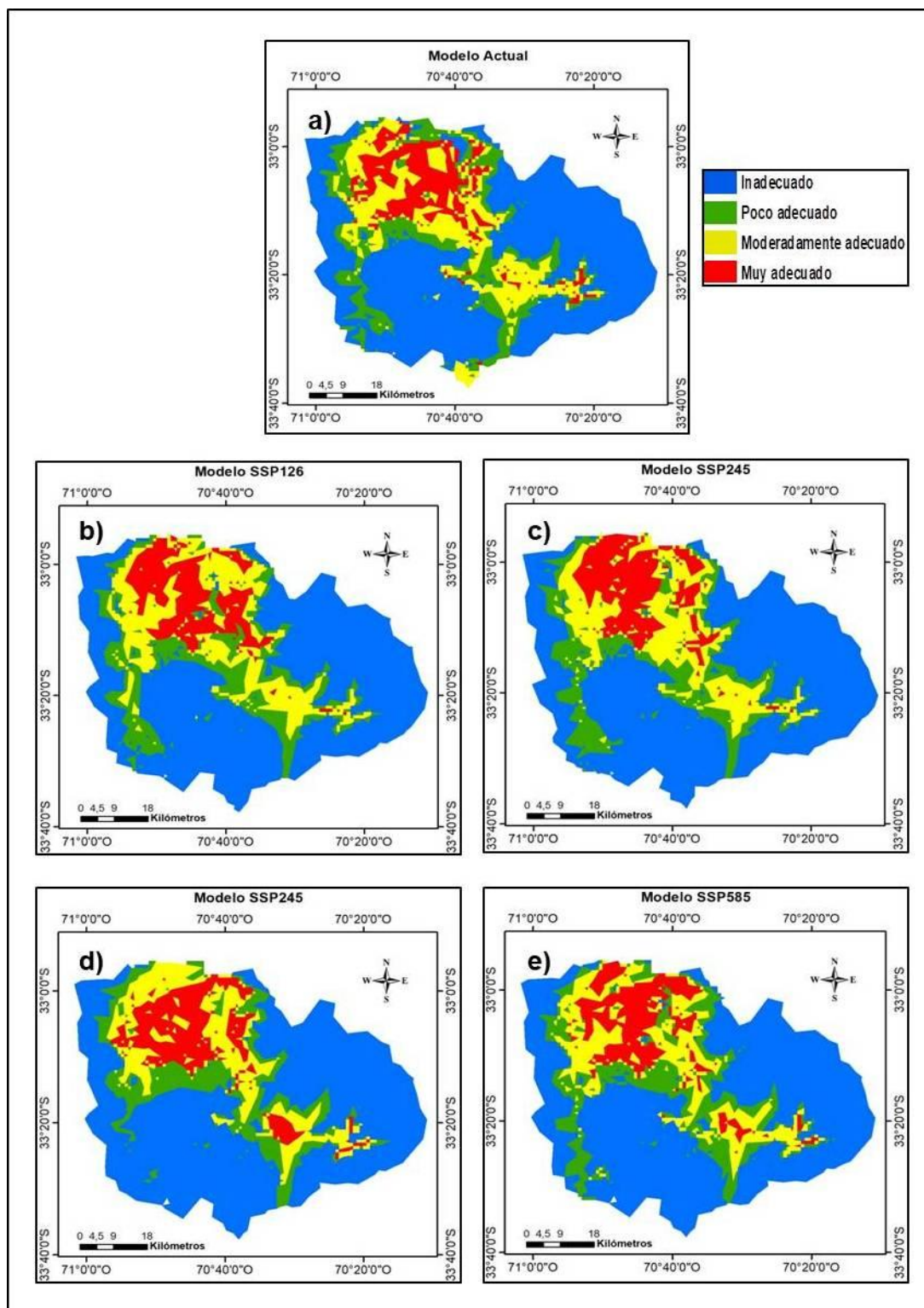


Figura 7. Proyección potencial actual y futura (2021-2040) de mapas de idoneidad de hábitat bajo escenarios de emisiones futuras (SSP) para *Porlieria chilensis*, en las provincias de Chacabuco y Santiago.

Dada la categoría de Vulnerable de la especie, la evidencia de fragmentación y la limitada evidencia científica disponible, es imperativo implementar estrategias que prioricen los refugios climáticos. Estos espacios permiten mitigar los impactos al resguardar zonas heterogéneas que facilitan la adaptación o migración de la especie (Henson *et al.*, 2017; Michalak *et al.*, 2018; Pliscoff, 2022). Se proponen cuatro ejes fundamentales de acción:

1. Gestión de hábitat y conectividad: Priorizar áreas "Muy adecuadas" y establecer corredores biológicos que aseguren el flujo génico frente a la fragmentación proyectada y la migración hacia zonas estables, contrarrestando la dominancia de hábitats inadecuados en escenarios futuros.
2. Migración asistida: Evaluar el traslado controlado de germoplasma hacia zonas con mayor estabilidad térmica y pluviométrica, facilitando la adaptación ante el desplazamiento de los nichos ecológicos (Ipinza y Müller-Using, 2021).
3. Restauración y resiliencia hídrica: Seleccionar sitios de restauración bajo criterios bioclimáticos estrictos (precipitación anual y rangos térmicos invernales) y ejecutar obras de conservación de suelos para optimizar la infiltración pluvial ante el déficit hídrico proyectado en los escenarios climáticos más severos.
4. Monitoreo estratégico: Establecer parcelas de seguimiento en el límite norte de su distribución para detectar tempranamente la contracción del nicho y el fracaso en el reclutamiento, además de vigilar poblaciones en zonas de alto estrés estival, para prevenir extinciones locales por superposición de umbrales fisiológicos.

Limitaciones de este Estudio.

El modelo de distribución de *Porlieria chilensis* presenta limitaciones derivadas del sesgo en los datos de presencia y la falta de registros de ausencia real, lo que puede generar imprecisiones en la predicción del hábitat. Metodológicamente, el uso de un número limitado de variables bioclimáticas resulta insuficiente, omitiendo factores clave como el suelo, la topografía y la incertidumbre inherente a los modelos de circulación general (MCG). Además, el estudio no integra presiones antrópicas críticas —como la actividad minera, agrícola, incendios y cambios de uso de suelo— que influyen directamente en su estado de vulnerabilidad. Por ello, se concluye que el hábitat potencial modelado puede no coincidir con el real, subrayando la necesidad de incorporar variables adicionales y reducir las suposiciones internas del modelo en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la crisis climática actual y proyectada constituye una amenaza crítica para la estabilidad ecológica de *Porlieria chilensis* en la zona central de Chile. Este estudio permitió modelar con alta precisión la idoneidad del hábitat actual y futuro de *Porlieria chilensis*, una especie endémica y vulnerable, proporcionando una base científica para su conservación en dos provincias de la Región Metropolitana.

El algoritmo Maxent demostró ser una herramienta eficaz para modelar el nicho ecológico de la especie, alcanzando valores de AUC superiores a 0,80 en todos los escenarios evaluados (actual y futuros). Estos resultados confirman una alta capacidad predictiva, validando el uso de modelos de máxima entropía para la gestión de especies amenazadas con registros de presencia específicos. Mediante el modelado de máxima entropía (Maxent), se determinó que la especie posee un nicho ecológico térmico estrecho y altamente especializado, condicionado principalmente por la temperatura máxima del mes más cálido (Bio5), la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio8) y el rango diurno promedio (Bio2). La identificación de un umbral crítico de tolerancia térmica a los 31 °C y la dependencia de oscilaciones térmicas diarias específicas entre 14 °C y 15.5 °C, marcan la vulnerabilidad fisiológica de la especie ante los eventos climáticos extremos.

Las proyecciones futuras para el periodo 2021-2040, bajo diversos escenarios de emisiones (SSP), revelan una tendencia sistemática hacia la degradación y fragmentación del hábitat. Particularmente, el escenario SSP370 se perfila como el más perjudicial, proyectando un incremento del 7,25 % en áreas inadecuadas y una contracción del 15 % en hábitats moderadamente adecuados, lo que transforma el paisaje en un sistema de parches aislados con baja conectividad biológica. Aunque se observan persistencias de núcleos de alta idoneidad, estos quedan rodeados por una matriz ambiental adversa que incrementa el riesgo de aislamiento y extinciones locales.

En consecuencia, la viabilidad a largo plazo de *P. chilensis*, especie actualmente declarada como Vulnerable, depende de la implementación urgente de estrategias de conservación adaptativa, especialmente en la provincia de Chacabuco, donde la presencia del tipo forestal esclerófilo es predominante, en sitios que conservan o adquieran una idoneidad de hábitat “Muy adecuado”. Es imperativo transitar hacia una gestión que priorice la identificación de refugios climáticos, el establecimiento de corredores biológicos que aseguren el flujo génico y la evaluación de programas de migración asistida hacia zonas de mayor estabilidad térmica y pluviométrica. Sin intervenciones que consideren estos criterios bioclimáticos y promuevan la resiliencia hídrica, la especie enfrenta un riesgo inminente de declive poblacional severo, en sintonía con el colapso proyectado para el ecosistema mediterráneo chileno.

REFERENCIAS

- Alverdi, V. (2020).** Modelado de distribución de especies en los bosques de los Andes meridionales. Papeles de Geografía, N° 66. Pp: 195-207. <https://doi.org/10.6018/geografia.409051>
- Arroyo, M. T. K., Pauchard, A., Alarcón, D., Armesto, J., Bozinovic, F., Bustamante, R., Echeverría, C. et al. (2019).** Impactos del cambio climático en la biodiversidad y las funciones ecosistémicas en Chile. En: Marquet, P.A. et al. (Eds.). Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de biodiversidad. Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Pp: 1-66 En: https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/d4/15/d41549d2-4080-4ef1-be0d-b647d723180e/impactos_del_cambio_climatico_en_la_biodiversidad.pdf
- Atwater, D.Z., Ervine, C. & Barney, J.N. (2018).** Climatic niche shifts are common in introduced plants. (2018). Nat. Ecol. Evol. N°2. Pp: 34-43. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0396-z>
- Ávila, C., Griffith, D. & Espinosa, C. (2024).** Modelos de distribución de especies y estado de conservación de murciélagos amenazados en la región tumbesina de Ecuador y Perú. Revista de Biología Tropical, 72: e54459. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.54459>
- Bambach, N., Meza, F.J., Gilabert, H. & Miranda, M. (2013).** Impacts of climate change on the distribution of species and communities in the Chilean Mediterranean ecosystem. Regional Environmental Change 13(6): 1.245-1.257. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0425-7>
- Benavides, E., Sadler, J., Graham, L. & Matthews, T. (2024).** Species distribution models and island biogeography: Challenges and prospects. Global Ecology and Conservation, 51, e02943. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02943>
- Brouwer, M. (2020).** Análisis de la distribución potencial de especies representativas de Canarias y su proyección en diferentes escenarios de cambio climático. (Trabajo de Fin de Grado, Sección de Biología, Universidad de Laguna). 21p. Repositorio Institucional. En: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21695/Analisis%20de%20la%20distribucion%20potencial%20de%20especies%20representativas%20de%20Canarias%20y%20su%20proyeccion%20en%20diferentes%20escenarios%20de%20cambio%20climatico..pdf?sequence=1>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2024).** Monitoreo de cambios, corrección gráfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales de la Región Metropolitana: Informe técnico (Actualización 2019). Departamento de Monitoreo de Ecosistemas y Cambio Climático. <https://sit.conaf.cl>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2025).** Determinación del impacto de la mega sequía en las emisiones por degradación en bosques mediterráneos y templados de Chile (Nota Informativa N° 41). Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV). <https://www.enccrv.cl>

- Cueto, D.A., Alaniz, A. J., Hidalgo-Corrotea, C., Vergara, P.M., Carvajal, M.A., y Barrios-Saravia, A. (2025). Chilean Mediterranean forest on the verge of collapse? Evidence from a comprehensive risk analysis. *Science of the Total Environment*, 964, 178557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178557>
- Damaneh, J.M., Ahmadi, J., Rahmadian, S., Sadeghi, S.M.M., Nasiri, V. & Borz, S.A. (2022). Prediction of wild pistachio ecological niche using machine learning models. *Ecological Informatics* 72 (8): 101907. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101907>
- Donoso, C. (1981). Tipos Forestales de los Bosques Nativos de Chile. Documento de Trabajo N°38. Investigación y desarrollo forestal (CONAF/PNUD/FAO). Publicación FAO, Chile.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudik, M., S. Ferrier, Guisan, A., et al. (2006). Novel methods-improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* N° 29. Pp: 129–151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, L. & Leathwick, J.R. (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677-697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Escoto, A., Sanchéz, L. & Gachuz, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3): 669-693. <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- ESRI. (2014). ArcGIS Desktop: Release 10.2. Environmental Systems Research Institute.
- Fan, X., Miao, C., Duan, Q., Shen, C., & Wu, Y. (2020). The performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 125(18), e2020JD033031. <https://doi.org/10.1029/2020jd033031>
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: nuevas superficies climáticas con resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales. *Revista Internacional de Climatología*, 37 (12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Franklin, J. (2013). Species distribution models in conservation biogeography: Developments and challenges. *Divers. Distrib.* N° 19. Pp: 1217–1223. <https://doi.org/10.1111/ddi.12125>
- Fuentes, I.M., González-Oliva, L., Baró, I., González, M.T. & Mancina, C.A. (2019). Efecto potencial del cambio climático sobre la distribución de plantas asociadas a bosques húmedos del oriente de Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 218(2): 160-170. En: <https://revistasgeotech.com/index.php/abc/article/download/295/240/>
- García, K., Lasco, R., Inés, A., Lyon, B., y Pulhin, F. (2013). Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines. *Applied Geography*, N° 44. Pp: 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.005>
- Gonçalves Pedroza, C.E., Menezes Sousa, P.R. & de Brito, S.F. (2024). Uso do modelo Maxent para prever a potencial distribuição de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira De Meio Ambiente*, 12(2): 51-63. En: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1571>
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J.B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P.R., Tulloch, A.I.T., Regan, T.J. et al. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16(12): 1424-1435. <https://doi.org/10.1111/ele.12189>
- Guisan A. & Zimmermann N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, N° 135. Pp: 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Guo, J., Zhang, M., Bi, Y., Zhao, Z., Wang, R. & Li, M. (2024). Spatiotemporal distribution prediction of the relict and endangered plant *Tetraena mongolica* in inner Mongolia, China, under climate change. *Sci. Rep.*, N° 14, 28478. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79088-6>

- Guzmán-Santiago, J.J., Santos-Posadas, H.M., Ángeles-Pérez, G., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., Rodríguez-Ortiz, G. & Corona-Núñez, R.O. (2024). Efecto del cambio climático en la distribución de las especies de clima templado en Oaxaca, México. *Botanical Sciences*, 102(1): 39-53. <https://doi.org/10.17129/botsci.3355>
- Hayat, U., Shi, J., Wu, Z., Rizwan, M. & Haider, M.S. (2024). Which SDM Model, CLIMEX vs. Maxent, Best Forecasts *Aeolesthes sarta* Distribution at a Global Scale under Climate Change Scenarios? *Insects* 15(5): 324. <https://doi.org/10.3390/insects15050324>
- Hechenleitner, P., Gardner, M.F., Thomas, P.I., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martínez, C. (2005). Plantas amenazadas del centro-sur de Chile. Distribución, conservación y propagación. Primera edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188 p.
- Henson, S.A., Beaulieu, C., Ilyina, T., John, J.G., Long, M.C., Séférián, R., Tjiputra, J., & Sarmiento, J.L. (2017). Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems. *Nature Communications*, 8, 14682. <https://doi.org/10.1038/ncomms14682>
- Hernández-Ruiz, J., Herrera-Cabrera, B.E., Delgado-Alvarado, A., Salazar-Rojas, V.M., Bustamante-González, A., Campos-Contreras, J.E., & Ramírez-Juárez, J. (2016). Distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) en Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*, 64(1): 251-262. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v64i1.17849>.
- Hosseini, N., Ghorbanpour, M. & Mostafavi, H. (2024). Habitat potential modelling and the effect of climate change on the current and future distribution of three *Thymus* species in Iran using Maxent. *Sci Rep* 14, 3641. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53405-5>
- IPCC. (2014). Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M. et al. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. En: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_en-1.pdf
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. In: Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., et al. (Eds.). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. En: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/02_Summary-for-Policymakers_SPM.pdf
- Ipinza, R. & Müller-Using, S. (2021). *Migración asistida de Araucaria araucana*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Ministerio de Agricultura de Chile (MINAGRI). <https://doi.org/10.4060/cb2901es>
- Jiménez-García, D. & Peterson, A.T. (2019). Climate change impact on endangered cloud forest tree species in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902781. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2781>
- Koç, D.K., Beyza Ustaoglu, B. & Biltekin, D. (2024). Effect of climate change on the habitat suitability of the relict species *Zelkova carpinifolia* Spach using ensemble species distribution modeling. *Scientific Reports*, 14, 27967. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78733-4>
- Kumar, D., Rawat, S. & Joshi, R. (2021). Predicting the current and future suitable habitat distribution of the medicinal tree *Oroxylum indicum* (L.) Kurz in India. *Jour. Appl. Res. Med. Aromatic Plants*, 23, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2021.100309>.
- Ledig, F. T., Rehfeldt, G.E., Saenz-Romero, C. & Flores-Lopez, C. (2010). Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97(6): 970-987. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900329>
- Lima, V.P., de Lima, R.A.F., Joner, F., Siddique, I., Raes, N. & ter Steege, H. (2022). Climate change threatens native potential agroforestry plant species in Brazil. *Sci Rep.*, 12, 2267. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06234-3>

- Loayza, A.P., Ríos, R.S., Carvajal, D.E., & Gatica, A. (s. f.). Estado de conservación de *Porlieria chilensis*: Evaluación a través de modelos poblacionales matriciales, ecología y patrones de distribución. Informe final de proyecto. Fondo de Investigación del Bosque Nativo; Corporación Nacional Forestal. En: https://investigacion.conaf.cl/archivos/repositorio_documento/2019/04/015-2012-Loayza-Informe-Final.pdf
- Loyola Díaz, C.D. (2017). Distribución actual y potencial del tipo forestal esclerófilo en la Zona Central de Chile. Memoria de título, Universidad de Chile. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. En: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151378/Distribucion-actual-potencial-tipo-forestal-esclerofilo-Zona-Central-de-Chile.pdf?sequence=1>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 2da Edición. Santiago de Chile: Editorial Universitaria. 384 pp.
- Mateo, R.G., Felicísimo, Á.M. & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. Revista Chilena de Historia Natural, 84(2): 217–240. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>.
- Mao, X., Zheng, H., Luo, G., Liao, S., Wang, R., Tang, M., & Chen, H. (2024). Climate change favors expansion of three *Eucalyptus* species in China. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1443134. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443134>.
- Marcer, A., Sáez, L., Molowny-Horas, R., Pons, X., & Pino, J. (2013). Using species distribution modelling to disentangle realized versus potential distributions for rare species conservation. *Biological Conservation*, 166(2013): 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.07.001>
- Martínez-Sifuentes, A.R., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J.L., Hernández-Herrera, J.A., Estrada-Avalos, L., & Velázquez-Pérez, A.H. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *IForest*, N°13. Pp: 426-434. <https://doi.org/10.3832/for3491-013>.
- Medina-Amaya, M., Ruiz-Gómez, M.G. & Gómez Díaz, J.A. (2021). Análisis de la Distribución de *Cedrela Salvadorensis* Standl. (Meliaceae) e Implicaciones para su Conservación. *Gayana Bot*, 78(2): 172-183. En: <https://gayanabotanica.cl/index.php/gb/article/view/404>
- Merow, C., Smith, M.J. & Silander, J.A. (2013). A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, N° 36. Pp: 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Michalak, J. L., Lawler, J. J., Roberts, D. R., y Carroll, C. (2018). Distribution and protection of climatic refugia in North America. *Conservation Biology*, 32(6): 1414–1425. <https://doi.org/10.1111/cobi.13155>
- Miranda, A., Carrasco, J., González, M., Mentler, R., Moletto, Í., Altamirano, A. & Lara, A. (2020). Informe Proyecto ARCLIM: Bosques Nativos y Plantaciones Forestales. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, U. de La Frontera, Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería, UCh y UACH coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Temuco. En: https://arclim.mma.gob.cl/media/informes_consolidados/06_BOSQUESNATIVOS_PLANTACIONESFORESTALES.pdf
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J.D. & Tinoco-Rueda, J.A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1): 29-43. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.029>.
- Moreno, R., Zamora, R., Molina, J.R., Vázquez, A. & Herrera, M.Á. (2011). Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, 6(6): 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.003>.
- Osorio, M. (2022). Los modelos de cambio climático futuro como predictores de la reducción del área de distribución de dos especies de cíclidos endémicos de Honduras. *Biología Acuática* N° 38. <https://doi.org/10.24215/16684869e028>
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, N° 190. Pp: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

- Phillips, S.J. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, N° 31. Pp: 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E. & Blair, M.E. (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, N° 40. Pp: 887- 893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Plasencia-Vázquez, A.H., Vélchez-Ponce, C.R., Ferrer-Sánchez, Y. & Veloz-Portillo, C.E. (2022). Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>
- Plischoff, P. (2022). Identificación de refugios climáticos terrestres y marinos para la biodiversidad en la Patagonia chilena (Informe de Proyecto). Programa Austral Patagonia; Universidad Austral de Chile. En: https://programaaustralpatagonia.cl/wp-content/uploads/2022/12/Plischoff_Refugios_Patagonia_FINAL-2.pdf
- Plischoff, P. (2023). Análisis de vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres de Chile bajo escenarios de cambio climático (Informe Consultoría para la Actualización del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad). Centro UC Cambio Global / Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB). En: https://expedientes.mma.gob.cl/storage/2025/06/09/expedientes/pdf/doc_7_20250609145512.pdf
- Poutay, M., y Plischoff, P. (2023). Modelos de distribución de especies en Chile: proyecciones futuras bajo escenarios de riesgo climático (Informe Consultoría de Vulnerabilidad para Actualización del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad). Centro UC Cambio Global / Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB). En: https://expedientes.mma.gob.cl/storage/2025/06/09/expedientes/pdf/doc_7_20250609145229.pdf
- Prober, S.M., Thiele, K.R., Rundel, P.W., Yates, C.J., Berry, S.L., Byrne, M., Christidis, L. et al. (2012). Facilitating adaptation of biodiversity to climate change: a conceptual framework applied to the world's largest Mediterranean-climate woodland. *Climatic Change*, 110(1-2): 227-248. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0092-y>.
- Qasim, S., Mahmood, T., Rakha, B.A., Nadeem, M.N., Akrim F., Aslam, A. & Belant, J.L. (2024). Predicting current and future habitat of Indian pangolin (*Manis crassicaudata*) under climate change. *Sci. Rep.* N°14, 7564. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58173-w>
- Quesada-Quiroz, M., Acosta-Vargas, L., Arias-Aguilar, D. & Rodríguez-González, A. (2016). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14(34): 1-12. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.2991>
- Robinson, N.M., Nelson, W.A., Costello, M.J., Sutherland, J.E., & Lundquist, C.J. (2017). A Systematic Review of Marine-Based Species Distribution Models (SDMs) with Recommendations for Best Practice. *Frontiers in Marine Science*, 4, 421. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00421>
- Rodríguez-Ruiz, R., Juárez-Agis, A., García-Sánchez, S., Olivier-Salome, B., Ortiz-Bermúdez, E. & Ramírez-Barrios R. (2024). Modelado de idoneidad ambiental e implicaciones del cambio climático en la distribución de *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) Franco para México. *Revista Ciencias Ambientales*, 58(1): 108-124. <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.7>
- Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A.I., Sánchez-Torres G., Vargas-Castilleja, R.C., Báez-Vásquez, J. & Conde-Álvarez, A.C (2022). Breve Guía para la Selección, Descarga y Aplicación de Escenarios de Cambio Climático para México. De acuerdo con los últimos escenarios del IPCC. UACH-UNAM-BUAP-UAT-ISF-México, A.C. 98 p. En: <http://cirenam.chapingo.mx/cambio-climatico/folleto/>
- Santibáñez, F., Santibáñez, P., Caroca, C., & Roa, P. (2013). Atlas de cambio climático de la zona semiárida de Chile. Centro de Agricultura y Medio Ambiente), Universidad de Chile, Ministerio del Medio Ambiente. En: <https://educacion.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/09/Atlas-CC-ZonaAridas-Semiáridas-Chile.pdf>
- Shen, Y., Zhang, Y, Zhong, W., Xia, H., Hao, Z., Zhang, C. & Li, H. (2022). Predicting the impact of climate change on the distribution of two relict *Liriodendron* species by coupling the Maxent model and actual physiological indicators in relation to stress tolerance. *J. Environ. Manage.* 322, 116024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116024>

- Shi, X., Yin, Q., Sang, Z., Zhu, Z., Jia, Z. & Ma, L. (2021). Prediction of potentially suitable areas for the introduction of *Magnolia wufengensis* under climate change. *Ecol. Indic.* 127, 107762. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107762>.
- Tarnian, F., Kumar, S., Azarnivand, H., Chahouki, M.A.Z. & Mossivand, A.M. (2021). Assessing the effects of climate change on the distribution of *Daphne mucronata* in Iran. *Environ. Monit. Assess.* 562. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09311-8>
- Tesfamariam, B.G., Gessesse, B. & Melgani, F. (2022). Maxent-based modeling of suitable habitat for rehabilitation of *Podocarpus* forest at landscape-scale. *Environ. Syst. Res.* 11, 4. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00248-6>
- Torres Guasca, J. E. (2023). Modelo de distribución geográfica de la especie *Leopardus tigrinus* (VU) bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Trabajo de grado de Especialización, Universidad Antonio Nariño. Repositorio Institucional. En: <https://repositorio.uan.edu.co/items/12fd7998-bcbd-414f-9c25-e77432097624>
- Vaca, M.L., Vaca, V.E., Chusquicullma, D.F. & Ati, G.M. (2021). Modelado de Maxent, predicción de la distribución espacial de la vicuña en Ecuador. *Alfa publicaciones*, 3(3.1): 406-424. <https://doi.org/10.33262/ap.v3i3.1.109>
- Wang, F., Yuan, X., Sun, Y. & Liu, Y. (2024). Species distribution modeling based on Maxent to inform biodiversity conservation in the Central Urban Area of Chongqing Municipality. *Ecological Indicators*, 158, 111491. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111491>.
- Wei, L., Wang, G., Xie, C., Gao, Z., Huang, Q. & Jim, C.Y. (2024). Predicting suitable habitat for the endangered tree *Ormosia microphylla* in China. *Sci. Rep.* 14 (1), 10330. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61200-5>
- West, A. M., Kumar, S., Brown, C.S., Stohlgren, T.J. & Bromberg, J. (2016). Field validation of an invasive species Maxent model. *Ecological Informatics*, N°36. Pp: 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.11.001>
- Zhang, M., Jiang, D., Yang, M., Ma, T., Ding, F., Hao, M., Chen, Y., Zhang, C., Zhang, X. & Li M. (2021). Influence of the Environment on the Distribution and Quality of *Gentiana dahurica* Fisch. *Front Plant Sci.* 9, 706822. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.706822>
- Zurell, D., Franklin, J., König, C., Bouchet, P. J., Dormann, C. F., Elith, J., Fandos, G. et al. (2020). A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography*, 43(9): 1261-1277. <https://doi.org/10.1111/ecog.04960>



ARTÍCULO

Rigidez dinámica en compuestos lignocelulósicos de *Pinus pseudostrobus* aglutinados con proteína de trigo y aditivos minerales.Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*} ; Sonia Correa Jurado² ; Kayo Kudo³ ¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, javier.sotomayor@umich.mx² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 0213761h@umich.mx³ Universidad Prefectural de Akita, Noshiro, Japón, kayokudo@iwt.akita-pu.ac.jp

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.665>

Recibido: 09.06.2026; Aceptado 17.06.2026.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de aditivos minerales sobre el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* aglutinados con proteína de trigo. Se incorporaron bentonita, carbonato de calcio e hidróxido de calcio al 5 % en masa. La densidad y el contenido de humedad se determinaron conforme a normas estandarizadas, mientras que la velocidad de onda y el módulo dinámico se evaluaron mediante ensayos no destructivos de ondas de esfuerzo. La densidad varió entre 438 y 457 kg·m⁻³ sin diferencias significativas ($p = 0,071$; $\eta^2 = 0,13$), mientras que la velocidad de onda y el módulo dinámico mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0,001$; $\eta^2 \geq 0,77$). Los tratamientos con bentonita y carbonato de calcio incrementaron la velocidad de onda (~9 %) y el módulo dinámico (18–20 %) respecto al control, mientras que el hidróxido de calcio redujo ambas propiedades (~10 % y 21 %). Se concluye que los aditivos modifican diferencialmente la microestructura, favoreciendo la continuidad estructural en bentonita y carbonato de calcio y deteriorando la cohesión en el sistema con hidróxido de calcio. Las ondas de esfuerzo se validan como herramientas sensibles para evaluar la integridad estructural en biocompuestos.

Palabras clave: Compuestos lignocelulósicos; ondas de esfuerzo; módulo dinámico; aditivos minerales

SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the effect of mineral additives on the dynamic behavior of lignocellulosic composites based on *Pinus pseudostrobus* sawdust bonded with wheat protein. Bentonite, calcium carbonate, and calcium hydroxide were incorporated at 5% by mass. Density and moisture content were determined according to standardized methods, while wave velocity and dynamic modulus were evaluated using non-destructive stress wave techniques. Density ranged from 438 to 457 kg·m⁻³ without significant differences ($p = 0.071$; $\eta^2 = 0.13$), whereas wave velocity and dynamic modulus showed highly significant differences ($p < 0.001$; $\eta^2 \geq 0.77$). Treatments with bentonite and calcium carbonate increased wave velocity (~9%) and dynamic modulus (18–20%) compared to the control, while calcium hydroxide reduced both properties (~10% and 21%). It is concluded that mineral additives differentially modify the microstructure, enhancing structural continuity in bentonite and calcium carbonate systems and reducing cohesion in the calcium hydroxide system. Stress wave techniques are validated as sensitive tools for assessing structural integrity in biocomposites.

Key words: Lignocellulosic composites; stress waves; dynamic modulus; mineral additives

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de compuestos lignocelulósicos se ha consolidado como una estrategia sostenible para valorar residuos forestales y reducir la dependencia de polímeros sintéticos, en el marco de la transición hacia materiales de menor impacto ambiental. En estos sistemas, el desempeño mecánico está controlado por la interacción entre la matriz lignocelulósica, el sistema adhesivo y los aditivos incorporados, donde la



calidad interfacial determina la eficiencia en la transferencia de esfuerzos y la rigidez efectiva del material (Mohammed *et al.*, 2022). En este contexto, los aditivos minerales se emplean para modificar la microestructura; sin embargo, su influencia sobre las propiedades dinámicas evaluadas mediante propagación de ondas de esfuerzo aún no ha sido establecida de manera consistente en sistemas particulados.

Los compuestos lignocelulósicos a base de aserrín presentan una estructura heterogénea caracterizada por vacíos, interfaces débiles y distribución irregular de partículas, lo que condiciona la transferencia de esfuerzos y la respuesta mecánica. En estos sistemas, la densidad constituye un descriptor volumétrico asociado a la porosidad, mientras que la distribución y conectividad de los poros controlan la respuesta mecánica al actuar como zonas de disipación de energía y discontinuidad estructural; en particular, la porosidad reduce significativamente el módulo elástico al interrumpir la transmisión de esfuerzos en el medio (Chakma & Luo, 2024), por lo que la propagación de ondas y el módulo dinámico dependen principalmente de la integridad estructural y la continuidad del sistema.

Los adhesivos derivados de proteínas vegetales, debido a su origen renovable y al menor impacto que producen en el medioambiente, se han presentado como una opción ecológica frente a las resinas sintéticas. No obstante, estos adhesivos presentan limitaciones asociadas a su sensibilidad a la humedad y a una menor resistencia mecánica, derivadas de la naturaleza de sus redes de enlace y su estabilidad estructural en presencia de agua (Frihart & Hunt, 2025). Desde el punto de vista de los mecanismos de interacción, la eficiencia adhesiva depende de la conformación molecular de las proteínas, la disponibilidad de grupos funcionales y su capacidad de formar redes cohesivas e interacciones con la superficie lignocelulósica. Esto condiciona la transferencia de esfuerzos a nivel interfacial, por lo que la modificación mediante agentes que refuerzan estas redes resulta necesaria para mejorar su desempeño.

La incorporación de aditivos minerales en compuestos lignocelulósicos modifica la rigidez del material mediante la reducción de la porosidad y la mejora de la continuidad estructural, lo que incide directamente en la eficiencia de la transferencia de esfuerzos. En estos sistemas, los rellenos actúan como fases de refuerzo que alteran la distribución de tensiones y la interacción matriz-partícula, donde la dispersión, el tamaño de partícula y la calidad de la interfaz determinan la respuesta mecánica global (Fu *et al.*, 2008). En particular, una adhesión interfacial deficiente limita la eficiencia de carga y genera variabilidad en el comportamiento mecánico del material, lo que restringe la extrapolación de resultados entre sistemas y hace necesaria su evaluación específica en matrices lignocelulósicas con adhesivos proteicos.

La bentonita sódica, compuesta principalmente por montmorillonita, presenta una estructura laminar con elevada superficie específica que favorece su interacción con matrices lignocelulósicas. En sistemas compuestos, la incorporación de arcillas laminares reduce la porosidad y mejora la cohesión interna mediante el incremento del área interfacial efectiva y la redistribución de tensiones, lo que se traduce en un aumento de la rigidez del material (Ray & Okamoto, 2003). No obstante, su carácter hidrofílico puede incrementar la absorción de humedad, afectando la estabilidad dimensional y el desempeño mecánico bajo condiciones higroscópicas. En consecuencia, el efecto de la bentonita depende del equilibrio entre densificación estructural, interacción interfacial y sensibilidad a la humedad.

El carbonato de calcio es un relleno mineral ampliamente utilizado en compuestos lignocelulósicos debido a su estabilidad química y disponibilidad. En estos sistemas, su incorporación modifica la microestructura mediante un efecto de relleno que reduce la porosidad y mejora la continuidad estructural, favoreciendo la transferencia de esfuerzos; la magnitud de este efecto depende críticamente de la dispersión, del tamaño de partícula y de la calidad de la interfaz con la matriz, factores que controlan la eficiencia de carga y la respuesta mecánica global del material (Srivabut *et al.*, 2018). En consecuencia, la variabilidad en estos parámetros condiciona el desempeño y limita la extrapolación entre sistemas lignocelulósicos particulados.

El hidróxido de calcio introduce un componente químicamente activo debido a su naturaleza alcalina, lo que puede modificar el entorno químico del sistema lignocelulósico. En sistemas con adhesivos proteicos, condiciones alcalinas inducen desnaturalización y reorganización estructural de las proteínas, promoviendo la exposición de grupos funcionales reactivos que modifican su comportamiento adhesivo (Lei *et al.*, 2008). Esto altera su capacidad de formar redes cohesivas y afecta la adhesión interfacial; asimismo, la alcalinidad

puede modificar la lignina y las hemicelulosas, influyendo en la interacción matriz–adhesivo. Sin embargo, la evidencia experimental en sistemas particulados con propiedades dinámicas sigue siendo limitada.

Las técnicas no destructivas basadas en la propagación de ondas de esfuerzo permiten evaluar la integridad estructural de materiales lignocelulósicos sin alterar su configuración interna. En estos sistemas, la velocidad de propagación está directamente relacionada con la rigidez dinámica y, junto con la densidad, permite estimar el módulo dinámico como indicador del comportamiento mecánico (Hillig *et al.*, 2024). En compuestos lignocelulósicos, la propagación de ondas está controlada por la microestructura, particularmente por la distribución de fases, la porosidad y la calidad de las interfaces, factores que gobiernan la transmisión y la atenuación de la energía mecánica. Sin embargo, su aplicación en sistemas particulados con aditivos minerales y adhesivos naturales es aún limitada, por lo que requiere una validación específica.

La literatura científica evidencia una creciente convergencia hacia el uso de aditivos minerales y adhesivos naturales en compuestos lignocelulósicos, impulsada por su potencial como materiales sostenibles; sin embargo, persisten inconsistencias asociadas a la variabilidad en la microestructura, la compatibilidad matriz-refuerzo y las metodologías de evaluación empleadas. En particular, la relación entre densificación, calidad interfacial y comportamiento dinámico evaluado mediante propagación de ondas no ha sido establecida de manera consistente en sistemas particulados, dado que las propiedades efectivas dependen de forma crítica de la organización microestructural y de las correlaciones espaciales entre fases. Esta falta de integración limita el desarrollo de modelos predictivos coherentes y justifica la necesidad de estudios experimentales controlados.

En este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo influye la incorporación de bentonita sódica, carbonato de calcio e hidróxido de calcio en el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos de *Pinus pseudostrobus* con adhesivo de proteína de trigo? Se plantea como hipótesis que estos aditivos modifican de manera diferenciada la densidad y la propagación de ondas de esfuerzo, generando cambios significativos en la rigidez dinámica del material. En consecuencia, el objetivo del estudio es evaluar experimentalmente estos efectos mediante un diseño controlado y un análisis estadístico robusto.

MATERIAL Y MÉTODO

Material

Se elaboraron compuestos lignocelulósicos a partir de aserrín de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y una formulación proteica derivada de harina de trigo. Se definieron un material de referencia y tres tratamientos con aditivos minerales (**Figura 1**). El aserrín se clasificó en fracciones granulométricas de > 850 μm (50 %), 850 μm (25 %), 425 μm (12,5 %) y 250 μm (12,5 %). El aserrín se acondicionó en cámara climática a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 % antes de su uso en la formulación.

La formulación proteica se preparó a partir de proteínas de trigo (25 %) y agua (200 %), en proporción respecto a la masa seca del aserrín, con el fin de obtener una matriz aglutinante capaz de recubrir y cohesionar las partículas lignocelulósicas. La mezcla se sometió a agitación mecánica hasta lograr una dispersión homogénea y la completa hidratación de la fase proteica, asegurando la formación de una red continua. La formulación se utilizó inmediatamente después de su preparación para evitar variaciones en la viscosidad y en su comportamiento reológico¹.

Se definieron cuatro formulaciones experimentales: un material control sin aditivos y tres tratamientos con incorporación de bentonita sódica, carbonato de calcio e hidróxido de calcio, cada uno al 5 % en masa respecto a la masa seca del aserrín. Los aditivos se pesaron de forma individual y se incorporaron durante

¹ Relativo a la **reología**, rama de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia cuando se le aplica una fuerza. (Nota del Editor).

la etapa de mezclado con la matriz lignocelulósica, garantizando su dispersión uniforme y su interacción con la fase proteica antes del proceso de conformado.



Figura 1. Aspecto macroscópico del compuesto lignocelulósico a base de aserrín de *P. pseudostrobus* aglutinado con adhesivo natural de proteína de trigo.

Preparación de Probetas

Cada formulación se mezcló mediante agitación mecánica hasta obtener una masa homogénea, asegurando la distribución uniforme del adhesivo y de los aditivos minerales en la matriz lignocelulósica. La mezcla se colocó en moldes de 2 cm × 17 cm × 17 cm y se compactó a una presión de 2,5 MPa durante 5 minutos, aplicando la carga de manera uniforme sobre toda la superficie.

Los paneles se desmoldaron y se sometieron a un secado escalonado a 40 °C, 60 °C, 80 °C y 103 °C, durante 24 horas por etapa, en estufa con control de temperatura hasta alcanzar un estado cercano al anhidro. Posteriormente, se obtuvieron 12 probetas por tratamiento con dimensiones de 2 cm × 2 cm × 15 cm. Las probetas se acondicionaron en cámara climática a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 %.

Determinación de Propiedades Físicas y Dinámicas

El contenido de humedad y la densidad se determinaron conforme a las normas ISO 13061-1 (International Organization for Standardization, 2014a) e ISO 13061-2 (International Organization for Standardization, 2014b), respectivamente.

Las propiedades mecánicas dinámicas se evaluaron mediante la técnica de ondas de esfuerzo en dirección longitudinal, utilizando un equipo instrumentado con sensores colocados en los extremos de la probeta. Se aplicó un impacto controlado en uno de los extremos y se registró el tiempo de tránsito de la señal entre sensores para determinar la velocidad de onda, a partir de la distancia efectiva entre puntos de medición y el tiempo promedio de propagación obtenido a partir de repeticiones del ensayo (Sotomayor & Hadachi, 2023).

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de la onda mecánica a través de la distancia entre dos acelerómetros posicionados en la probeta, utilizando el equipo *Metriguard 239A* (Metriguard Technologies, EE. UU.), con una precisión de ± 1 μ s (Figura 2). La velocidad de onda se determinó a partir de la relación entre la distancia efectiva entre sensores y el tiempo promedio de tránsito,

calculado a partir de tres mediciones por muestra. El módulo dinámico se calculó a partir de la densidad y la velocidad de onda, de acuerdo con el modelo físico establecido en la ecuación (1) (Baar *et al.*, 2012).

$$E = \rho v^2 \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo dinámico (MN/m²)

ρ = Densidad (kg/m³)

v = Velocidad de onda (m/s)

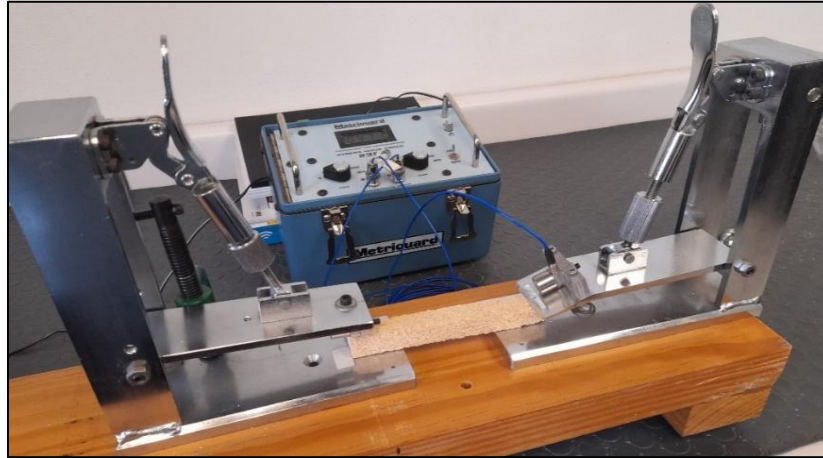


Figura 2. Esquema del montaje experimental para la determinación de la velocidad de onda en probetas lignocelulósicas mediante técnica de impacto longitudinal.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, considerando cada probeta como unidad experimental y el tipo de material como factor con cuatro niveles: material control sin aditivos, material con bentonita sódica, material con carbonato de calcio y material con hidróxido de calcio. Para cada tratamiento se evaluaron doce probetas obtenidas de paneles fabricados bajo condiciones controladas. Las variables de respuesta fueron la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico. El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza de un factor, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (Wahid *et al.*, 2017). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente, y en caso de significancia se aplicó la prueba LSD de Fisher para comparaciones múltiples.

RESULTADOS

El Cuadro 1 presenta los estadísticos descriptivos de las variables evaluadas, incluyendo la media (μ), la desviación estándar (σ), el coeficiente de variación (CV) y los intervalos de confianza al 95 % (IC), lo que permite caracterizar la tendencia central, la dispersión y la precisión de las mediciones. En este contexto, los valores de CV inferiores al 5 % en densidad y velocidad de onda evidencian alta homogeneidad experimental, mientras que los valores cercanos al 10 % en el módulo dinámico reflejan una mayor sensibilidad de esta propiedad a la variabilidad estructural del material. La superposición o separación de los intervalos de confianza permite una primera aproximación a la diferenciación entre tratamientos, particularmente evidente en las variables dinámicas.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las variables evaluadas por tratamiento.

Variable	Tratamiento	μ	σ	CV	IC
Densidad (ρ) (kg/m ³)	Control	450	12,4	2,8	442–458
	Bentonita	457	16,8	3,7	446–467
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	446	21,3	4,8	432–461
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	438	17,7	4,1	426–449
Velocidad de onda (v) (m/s)	Control	831	33,2	3,9	810–851
	Bentonita	904	27,5	3,1	887–920
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	905	26,1	2,9	890–921
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	747	32,6	4,4	727–767
Módulo dinámico (E) (MN/m ²)	Control	311	30,5	9,8	292–330
	Bentonita	373	25,3	6,8	357–389
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	366	34,1	9,3	345–387
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	244	24,4	9,9	229–260

μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%); IC = Intervalo de confianza a 95 %.

El **Cuadro 2** presenta los resultados del análisis de varianza, donde la densidad no muestra diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,071$), con tamaños de efecto bajos ($\eta^2 = 0,13$; $\omega^2 = 0,09$) y potencia insuficiente (0,52), lo que indica limitada capacidad del diseño para detectar diferencias reales en esta variable. En contraste, la velocidad de onda y el módulo dinámico presentan diferencias altamente significativas ($p < 0,001$), con tamaños de efecto grandes ($\eta^2 \geq 0,77$; $\omega^2 \geq 0,75$) y potencia estadística superior a 0,99, evidenciando que la variabilidad observada es atribuible predominantemente al efecto del tratamiento y que el diseño experimental posee alta sensibilidad para detectar cambios en estas propiedades. En conjunto, estos resultados indican que las variables dinámicas son más discriminantes que la densidad para evaluar el comportamiento del sistema, lo que es consistente con la dependencia de la propagación de ondas respecto a la conectividad estructural y la integridad interna del material.

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza y parámetros estadísticos.

Variable	F (3,44)	p	η^2	ω^2	Potencia
Densidad (kg/m ³)	2,51	0,071	0,13	0,09	0,52
Velocidad de onda (m/s)	75,23	< 0,001	0,83	0,82	> 0,99
Módulo dinámico (MN/m ²)	51,36	< 0,001	0,77	0,75	> 0,99

F (3,44) = estadístico F del ANOVA (razón entre varianza entre tratamientos y error); p = valor de probabilidad (significativo si $p < 0,05$); η^2 = proporción de varianza explicada; ω^2 = estimación ajustada de la varianza poblacional explicada; Potencia ($1 - \beta$) = probabilidad de detectar un efecto real (adecuado si $\geq 0,80$).

La densidad presentó valores promedio entre 438 y 457 kg/m³ entre tratamientos, con el mayor valor en bentonita y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue baja, con coeficientes de variación inferiores al 5 %, evidenciando homogeneidad en las mediciones. Los intervalos de confianza al 95 % mostraron traslape entre tratamientos, indicando una distribución similar de los valores de densidad dentro del rango experimental evaluado.

La velocidad de onda presentó valores promedio entre 747 y 905 m/s entre tratamientos, con los mayores valores en bentonita y carbonato de calcio, y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue baja, con coeficientes de variación inferiores al 5 %, evidenciando consistencia en las mediciones. Los intervalos de confianza al 95 % no mostraron traslape entre los tratamientos con mayores valores y el hidróxido de calcio, indicando una separación clara en la respuesta de la velocidad de propagación dentro del rango experimental evaluado.

El módulo dinámico por ondas de esfuerzo presentó valores promedio entre 244 y 373 MN/m² entre tratamientos, con los mayores valores en bentonita y carbonato de calcio, y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue moderada, con coeficientes de variación cercanos al 10 %, evidenciando

mayor dispersión respecto a las otras variables. Los intervalos de confianza al 95 % mostraron separación entre los tratamientos con mayores valores y el hidróxido de calcio, indicando diferencias claras en la rigidez dinámica dentro del rango experimental evaluado.

El análisis de varianza mostró que la densidad no presentó diferencias significativas entre tratamientos, con $p = 0,071$ y tamaños de efecto bajos (**Cuadro 2**). En contraste, la velocidad de onda evidenció diferencias altamente significativas, con $p < 0,001$, tamaños de efecto elevados y potencia estadística superior a 0,99. De manera similar, el módulo dinámico presentó diferencias significativas entre tratamientos, con $p < 0,001$, tamaños de efecto altos y potencia elevada, indicando una respuesta diferenciada de estas variables dinámicas en el sistema evaluado.

Las comparaciones múltiples, mediante la prueba LSD de Fisher, indicaron que los tratamientos con bentonita y carbonato de calcio conforman un grupo homogéneo, con valores superiores de velocidad de onda y módulo dinámico respecto al material control; en tanto, el tratamiento con hidróxido de calcio se ubicó en un grupo estadísticamente inferior ($p < 0,05$). No se detectaron diferencias significativas entre bentonita y carbonato de calcio para estas variables, lo que sugiere la presencia de mecanismos estructurales distintos, pero funcionalmente equivalentes en términos de transmisión de ondas.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que el comportamiento mecánico dinámico de los compuestos lignocelulósicos está gobernado por la interacción entre microestructura y propiedades físicas, particularmente a través de la continuidad estructural y la conectividad entre fases. En este contexto, la respuesta diferencial observada entre tratamientos indica que la transmisión de ondas de esfuerzo depende de la integridad del medio y de la distribución de heterogeneidades internas, las cuales controlan la propagación de la señal y la disipación de energía mecánica en sistemas particulados (Tippner *et al.*, 2016; Dackermann *et al.*, 2014).

La ausencia de diferencias significativas en la densidad (**Cuadro 1**) indica que esta variable no responde de manera consistente al efecto de los tratamientos, evidenciando una capacidad limitada para reflejar cambios estructurales en el sistema. En materiales lignocelulósicos particulados, la densidad global no representa adecuadamente la organización interna ni la calidad de las interfaces, ya que factores como la variabilidad de las partículas, la distribución del adhesivo y la presencia de vacíos controlan el comportamiento mecánico (Hassan *et al.*, 2013; Černý *et al.*, 2023), por lo que incrementos marginales en densidad no se traducen necesariamente en mejoras mecánicas cuando persisten discontinuidades y una distribución irregular de fases.

La velocidad de onda mostró una alta sensibilidad al tipo de tratamiento (**Cuadro 1**), indicando que la propagación está controlada por la conectividad interna y la continuidad estructural del material. En sistemas lignocelulósicos, la generación y evolución de microgrietas y discontinuidades internas modifican la transmisión de ondas al alterar la propagación de energía mecánica, lo que impacta directamente la velocidad de propagación y la respuesta dinámica del material (Huang *et al.*, 2022), explicando tanto los incrementos asociados a una mayor integridad estructural como las reducciones vinculadas a la degradación interna.

El módulo dinámico presentó una respuesta coherente con la velocidad de onda (**Cuadro 1**), evidenciando que la rigidez dinámica del material está directamente asociada a la capacidad de transmisión de la energía mecánica. En materiales lignocelulósicos, esta propiedad depende de la relación entre la densidad y la velocidad de propagación, de modo que pequeñas variaciones en la velocidad generan cambios amplificados en el módulo dinámico debido a su dependencia cuadrática, lo que explica la correlación directa entre la velocidad de onda y la rigidez en compuestos evaluados mediante técnicas acústicas no destructivas (Hu *et al.*, 2005); en consecuencia, incrementos en la continuidad estructural mejoran la rigidez, mientras que la presencia de discontinuidades reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos.

La comparación entre tratamientos permite establecer una jerarquía de desempeño en función de las propiedades dinámicas evaluadas. Los sistemas con bentonita y carbonato de calcio presentan respuestas

similares en velocidad de onda, consistente con el efecto de los rellenos minerales sobre la continuidad estructural en compuestos lignocelulósicos, donde la incorporación de partículas reduce la porosidad y la presencia de vacíos, favoreciendo la transmisión de esfuerzos (Huuhilo *et al.*, 2010); la ligera superioridad de la bentonita en el módulo dinámico sugiere una mayor eficiencia en la transferencia de esfuerzos a nivel interfacial. En contraste, el hidróxido de calcio evidencia una reducción marcada en ambas variables, indicando una menor integridad estructural del sistema.

La similitud en el desempeño entre bentonita y carbonato de calcio, pese a sus diferencias morfológicas, indica que ambos aditivos actúan principalmente como agentes de reducción de porosidad y mejora de la continuidad estructural. En sistemas lignocelulósicos, la incorporación de rellenos minerales reduce la presencia de vacíos y mejora la integridad del material al favorecer una distribución más homogénea de esfuerzos, lo que incrementa la rigidez del sistema (Srivabut *et al.*, 2018); adicionalmente, la estructura laminar de la bentonita promueve una mayor superficie de contacto y una transferencia de carga más eficiente a nivel interfacial, lo que explica su ligera superioridad en el módulo dinámico.

Los resultados se interpretan a partir de los cambios en la microestructura del sistema inducidos por cada aditivo y su efecto en la interacción entre fases. La bentonita, debido a su estructura laminar, favorece el empaquetamiento y reduce la porosidad, incrementando la conectividad interna, mientras que el carbonato de calcio actúa como relleno inerte que mejora la continuidad del medio; en contraste, el hidróxido de calcio, por su carácter alcalino, puede alterar la interacción adhesivo–matriz y generar zonas de debilidad estructural, ya que las modificaciones químicas en la interfaz pueden reducir la cohesión y afectar la transferencia de esfuerzos en compuestos lignocelulósicos (Lei *et al.*, 2008).

Desde la perspectiva de la propagación de ondas, los resultados pueden interpretarse en términos de la impedancia acústica del material, definida como el producto entre densidad y velocidad de onda, que controla la transmisión de energía mecánica. En el sistema evaluado, la ausencia de diferencias significativas en densidad (**Cuadro 2**) indica que las variaciones en la impedancia están dominadas por cambios en la velocidad de propagación. En consecuencia, los mayores valores de velocidad y módulo dinámico observados en bentonita y carbonato de calcio (**Cuadro 1**) reflejan una mayor continuidad estructural, mientras que la disminución en el tratamiento con hidróxido de calcio evidencia un incremento de discontinuidades internas que favorecen la dispersión y atenuación de la señal.

Desde el punto de vista estadístico, la diferencia en los tamaños de efecto entre variables (η^2 , ω^2) confirma que el sistema está gobernado predominantemente por propiedades dinámicas (velocidad de onda y módulo mecánico) más que por variables físicas (densidad), dado que los valores elevados observados en ambas variables dinámicas ($\eta^2 \geq 0,77$; $\omega^2 \geq 0,75$), junto con una potencia estadística superior a 0,99, evidencian que la mayor parte de la varianza es explicada por el efecto del tratamiento. En contraste, los valores bajos de tamaño de efecto y potencia en la densidad indican una contribución limitada de esta variable al comportamiento global del sistema. Esta diferenciación demuestra que el diseño experimental posee mayor capacidad discriminante para detectar cambios en la propagación de ondas y en la rigidez dinámica que en propiedades volumétricas. En términos físicos, este comportamiento es coherente con la relación funcional entre velocidad de onda y módulo dinámico, donde variaciones en v se reflejan directamente en E , evidenciando que la respuesta mecánica está controlada principalmente por la conectividad estructural y la integridad interna del material, más que por la densidad global.

Los mecanismos microestructurales propuestos se infieren a partir de la respuesta dinámica obtenida mediante técnicas no destructivas, sin validación mediante caracterización directa, lo que limita su confirmación experimental. Asimismo, el estudio se restringe a una única proporción de aditivos (5 %) y a condiciones específicas de procesamiento, por lo que la extrapolación de los resultados debe realizarse con cautela. La ausencia de técnicas microestructurales complementarias limita la verificación de la distribución de fases y la calidad interfacial, por lo que se recomienda su incorporación en estudios futuros para fortalecer la interpretación mecanística.

En síntesis, la incorporación de aditivos minerales modifica de manera significativa el comportamiento dinámico del material sin generar cambios relevantes en la densidad, lo cual es consistente con los resultados experimentales (**Cuadros 1 y 2**). La velocidad de onda emerge como la variable dominante del

sistema al reflejar la conectividad interna y la eficiencia en la transmisión de energía mecánica, evidenciado por su alta sensibilidad al tratamiento. Asimismo, se establece una diferenciación entre aditivos que favorecen la integridad estructural, como la bentonita y el carbonato de calcio, y aquellos que la reducen, como el hidróxido de calcio. En este sentido, futuras investigaciones podrían integrar caracterización microestructural y modelación multiescalar para fortalecer la interpretación estructural del comportamiento dinámico.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman la hipótesis de investigación: la incorporación de aditivos minerales modifica el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos con adhesivo de proteína de trigo sin inducir cambios estadísticamente significativos en la densidad. Este desacoplamiento sugiere que, en sistemas particulados, la densidad funciona como un descriptor volumétrico de primer orden, pero no como un predictor mecánico robusto, debido a su limitada capacidad para representar la conectividad estructural y la calidad de las interfaces. En contraste, la velocidad de onda se consolida como la variable más sensible al tratamiento, indicando que la propagación de energía mecánica está estrechamente asociada con la continuidad efectiva del medio. En consecuencia, el módulo dinámico refleja esta dependencia, donde variaciones en la velocidad de propagación se traducen en cambios amplificados en la rigidez.

Desde una perspectiva funcional, se establece una jerarquía entre los aditivos. La bentonita sódica presenta el mejor desempeño, asociado a su estructura laminar, que favorece el empaquetamiento y la interacción interfacial. El carbonato de calcio muestra un comportamiento comparable en términos de propagación de ondas, consistente con su papel como relleno que mejora la continuidad estructural. En contraste, el hidróxido de calcio reduce la respuesta dinámica del sistema, lo que puede asociarse a efectos químicos que afectan la cohesión del adhesivo y la interacción matriz-fase sólida.

En conjunto, los resultados indican que es posible mejorar la rigidez dinámica sin incrementar significativamente la densidad mediante el control de la estructura interna del material. Asimismo, se confirma la utilidad de las técnicas no destructivas basadas en ondas de esfuerzo como herramientas sensibles para evaluar la integridad estructural en compuestos lignocelulósicos. Estudios futuros podrían incorporar caracterización microestructural y enfoques integrados de análisis para fortalecer la interpretación del comportamiento observado.

RECONOCIMIENTOS

La investigación fue financiada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, y por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, México.

REFERENCIAS

- Baar, J., Tippner, J. & Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5): 767-769. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0550-2>
- Chakma, P. & Luo, Y. (2024). Impact of regular and irregular pore distributions on the elasticity of porous materials: A microstructure-free finite element study. *Materials*, 17(18): 4490. <https://doi.org/10.3390/ma17184490>
- Černý, M., Petruš, J. & Chamrádová, I. (2023). The influence of porosity on mechanical properties of PUR-based composites: Experimentally derived mathematical approach. *Polymers*, 15(8): 1835. <https://doi.org/10.3390/polym15081960>
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F. & Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47(5): 787-803. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0095-4>

- Frihart, C.R. & Hunt, C.G. (2025). Protein structure and wood adhesives. *Industrial Crops and Products*, 229, 121008. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121008>
- Fu, S.Y., Feng, X.Q., Lauke, B. & Mai, Y.W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6): 933-961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>
- Hassan, K.T.S., Horáček, P. & Tippner, J. (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources*, 8(2): 1634-1645. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645>
- Hillig, É., Bobadilla, I., Arriaga, F. & Íñiguez-González, G. (2024). Using acoustic testing to estimate strength and stiffness of wood–polymer composites. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, e0424. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.04>
- Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J. & Wang, F. (2005). Dynamic properties of three types of wood-based composites. *Journal of Wood Science*, 51(1): 7-12. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0614-y>
- Huuhilo, T., Martikka, O., Butylina, S. & Kärki, T. (2010). Mineral fillers for wood–plastic composites. *Wood Material Science & Engineering*, 5(1): 34-40. <https://doi.org/10.1080/17480270903582189>
- Huang, C., Li, M., Fang, S., Zhao, Y., Mao, F., Yang, Z. & Deng, T. (2022). Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*, 67(5): 744-759. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
- International Organization for Standardization. (2014a). ISO 13061-1: Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens—Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- International Organization for Standardization. (2014b). ISO 13061-2: Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- Lei, H., Pizzi, A. & Du, G. (2008). Environmentally friendly mixed tannin/lignin wood resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1): 203-209. <https://doi.org/10.1002/app.27011>
- Mohammed, M.M., Rasidi, M.S.M., Mohammed, A.M., Rahman, R.B., Osman, A.F., Adam, T., Betar, B.O. & Dahham, O.S. (2022). Interfacial bonding mechanisms of natural fiber–matrix composites: An overview. *BioResources*, 17(4): 7031-7090. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>
- Ray, S.S. & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11): 1539-1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>
- Sotomayor Castellanos, J.R. & Adachi, K. (2023). Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas. *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(3): 45–60. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.595>
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. & Hiziroglu, S. (2018). Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. *Construction and Building Materials*, N° 162. Pp: 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048>
- Tippner, J., Hrivnák, J. & Kloiber, M. (2016). Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods. *BioResources*, 11(1): 503-518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>
- Wahid, Z., Latiff, A.I. & Ahmad, K. (2017). Application of one-way ANOVA in completely randomized experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 949(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/949/1/012017>



ARTÍCULO

Variabilidad de la calidad de la madera en pie de *Pinus* spp. en localidades de los Andes colombianos.

Ricardo Andrés Oviedo-Celis^{1*} , Adriana Espinel-Cuadros¹ , Herwin Ramiro Roa-Caicedo¹, Ronald Alfonso Montañez¹ .

¹ Universidad Industrial de Santander, Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED, Programa de Ingeniería Forestal. Colombia. raovicel@correo.uis.edu.co; adriana2225600@correo.uis.edu.co; heroacai@correo.uis.edu.co; ronald.montanez@correo.uis.edu.co

*Autor para correspondencia: raovicel@correo.uis.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.666>

Recibido: 17.06.2026; Aceptado: 01.07.2026.

RESUMEN

La reforestación comercial constituye una actividad productiva orientada al uso de especies forestales de rápido crecimiento para el suministro de madera. Este estudio evaluó la variabilidad de propiedades de la madera en pie de especies del género *Pinus*, con el fin de determinar su calidad. El trabajo se desarrolló en tres municipios de Santander, Colombia, donde se estudiaron las especies *P. patula*, *P. maximinoi* y *P. tecunumanii* mediante un muestreo de campo realizado entre 2024 y 2025. La calidad de la madera fue estimada mediante una valoración ordinal (1 a 3) de nueve variables, integradas en un Índice General de Calidad de la Madera (IGCM), calculado a partir del promedio de las puntuaciones obtenidas en las variables individuales. Los datos fueron analizados mediante técnicas descriptivas y multivariadas para identificar patrones por especie y municipio. Las variables ramificación basal, rectitud del fuste, inclinación y espiralamiento del fuste presentaron puntuaciones óptimas, mientras que el 55 % de los individuos se agrupó en rangos intermedios de calidad. La comparación entre especies mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en el IGCM, mientras que entre municipios únicamente Zapatoca presentó diferencias significativas. El análisis multivariado evidenció que la reiteración, el ángulo y grosor de las ramas fueron variables con mayor incidencia sobre la calidad de la madera en pie. Se concluye que la región no presenta un óptimo de calidad en las plantaciones estudiadas; por tanto, esta evaluación constituye una herramienta útil para optimizar el manejo silvicultural en plantaciones forestales de la región andina colombiana.

Palabras clave: Desarrollo forestal, Gestión en masas coetáneas, Gobernanza forestal, Plantación forestal.

SUMMARY

Commercial reforestation is a productive activity focused on the use of fast-growing forest species to supply timber. This study evaluated the variability of the properties of standing timber from species of the genus *Pinus* in order to determine its quality. The study was conducted in three municipalities in Santander, Colombia, where the species *P. patula*, *P. maximinoi*, and *P. tecunumanii* were studied through field sampling carried out between 2024 and 2025. Wood quality was estimated using an ordinal scale (1 to 3) based on nine variables, which were incorporated into a General Wood Quality Index (GWQI) calculated as the average of the scores obtained for the individual variables. The data were analyzed using descriptive and multivariate techniques to identify patterns by species and municipality. The variables basal branching, stem straightness, stem inclination, and stem twist showed optimal scores, while 55% of the individuals fell into intermediate quality ranges. The comparison between species revealed significant differences ($p < 0.05$) in the IGCM, while among municipalities, only Zapatoca showed significant differences. The multivariate analysis showed that branch density, angle, and thickness were the variables with the greatest impact on the quality of standing timber. It is concluded that the region does not exhibit optimal quality in the plantations studied; therefore, this assessment serves as a useful tool for optimizing silvicultural management in forest plantations in the Colombian Andes.

Keywords: forestry development, even-aged management, forest governance, forest plantations.



INTRODUCCIÓN

Los recursos forestales son un activo ambiental estratégico para la sociedad, debido a los múltiples bienes y servicios ecosistémicos que aportan. Los bosques naturales cubren una extensión aproximada de 4,14 billones de hectáreas que suplen los requerimientos de madera a escala global (FAO, 2025). Sin embargo, la demanda creciente de esta materia prima a nivel global no puede ser totalmente suministrada por estos ecosistemas. Por tanto, promover cultivos forestales bajo modelos de manejo silvicultural sostenible es necesario para la conservación forestal.

Las plantaciones forestales son una estrategia económica de uso del suelo, cuyo fin es la producción de madera con calidad óptima para los mercados (Escobar-Sandoval *et al.*, 2018). El área forestal cultivada en Colombia comprende aproximadamente 549.611 ha, que contribuyen parcialmente al abastecimiento de la demanda nacional de madera (FEDEMADERAS, 2025). El uso y establecimiento de especies forestales introducidas ha permitido consolidar, con el paso del tiempo, núcleos de producción destinados al suministro de madera para las industrias del papel y la construcción (PROFOR, 2017). En este contexto, las especies del género *Pinus* han sido ampliamente promovidas debido a su alta capacidad de adaptación al suelo tropical, y a las condiciones climáticas en los Andes de Colombia, donde se han constituido como una de las principales alternativas de importancia económica forestal (UPRA, 2018).

La calidad de la madera es el resultado de la interacción entre las propiedades internas y el proceso de transformación (Valdés *et al.*, 2021); se trata de un concepto de amplio alcance para la ciencia forestal, cuya medición no responde a un único enfoque. Otras perspectivas asocian la calidad de la madera con el manejo silvicultural y las interacciones del árbol con las condiciones ambientales (Orozco *et al.*, 2016; Vignote *et al.*, s.f). Para el presente estudio, la calidad de la madera se aborda como una métrica de evaluación que integra atributos fenotípicos relevantes al momento de su clasificación con destino a la comercialización. Durante el ciclo productivo de una plantación forestal, los árboles desarrollan múltiples interacciones con las condiciones del entorno de crecimiento. Cuando estas interacciones no son monitoreadas ni manejadas adecuadamente, pueden generarse efectos directos sobre la calidad de la madera, reflejados en un desarrollo estructural irregular del cultivo forestal (Cuellar & Ramos, 2023). Lo anterior repercute negativamente en las proyecciones económicas del cultivo, debido a la presencia de defectos morfológicos como exceso de ramas, torceduras y formación irregular de nudos, variables consideradas estratégicas para la obtención de productos forestales de calidad en el mercado maderero (Nguyen *et al.*, 2014; Tenorio *et al.*, 2016; Murillo *et al.*, 2025).

En la región nororiental de Colombia, específicamente en el departamento de Santander, se han establecido áreas con especies del género *Pinus*. Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, estas plantaciones no han sido objeto de evaluación en atributos fenotípicos, a partir de los cuales se pueda establecer un referente de calidad de la madera en pie para la región. Lo anterior crea un sesgo de información, que puede con el paso del tiempo generar expectativas erradas para los reforestadores sobre la madera en crecimiento. Bajo este contexto, el objetivo de la presente investigación fue generar un referente de información sobre las variables de calidad de la madera en pie, de especies de rápido crecimiento del género *Pinus*, establecidas en Santander, con el fin de diagnosticar la realidad de estos cultivos y destacar la importancia del manejo silvicultural en la región andina de Colombia.

MATERIAL Y MÉTODO

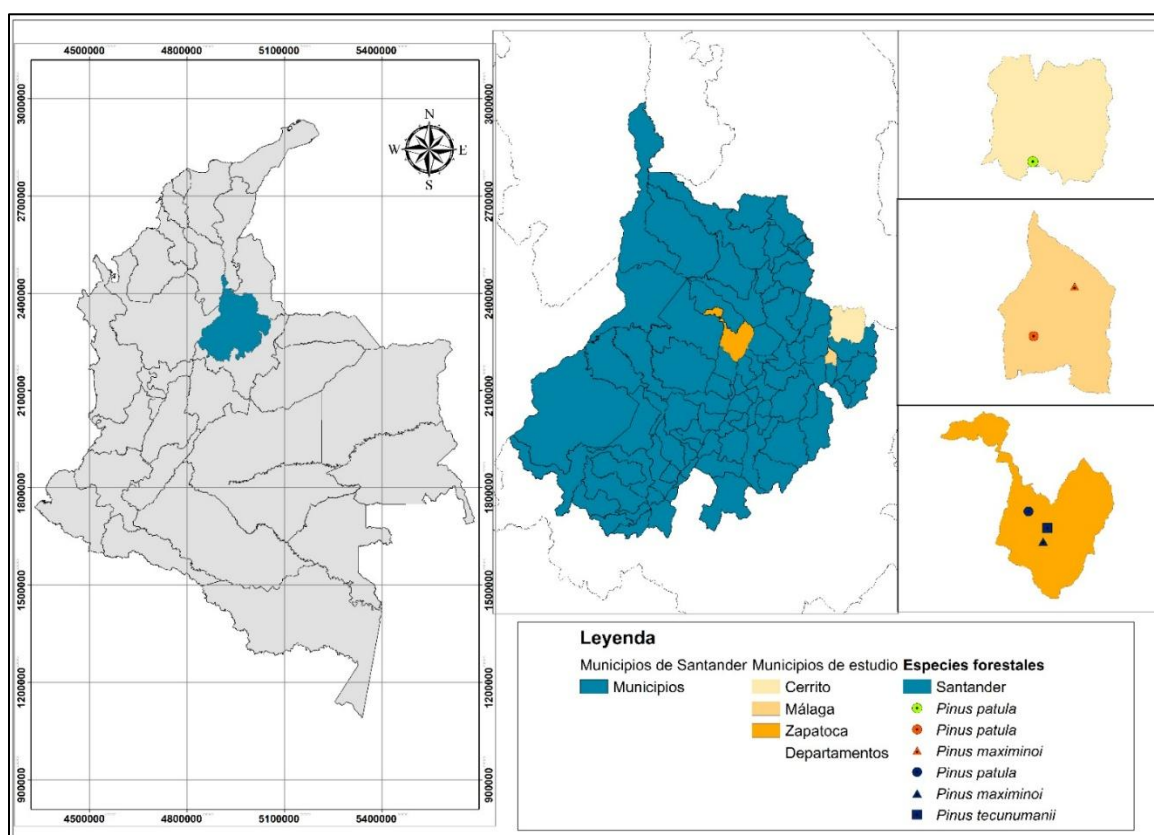
Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en tres localidades del departamento de Santander, ubicadas al nororiente de los Andes colombianos. La primera correspondió al municipio de Cerrito (C), donde se seleccionó para el muestreo una plantación de *Pinus patula* (Pp). La segunda área de estudio se ubicó en el municipio de Málaga (M), en el cual se seleccionaron plantaciones de *P. patula* (Pp) y *Pinus maximinoi* (Pm). Finalmente, en el municipio de Zapatoca (Z) se evaluaron plantaciones de *P. patula* (Pp), *P. maximinoi* (Pm) y *Pinus tecunumanii* (Pt). Las características de establecimiento y ubicación de estos sitios de muestreo se detallan en el Cuadro 1 y Figura 1.

Cuadro 1. Ubicación y características del establecimiento de plantaciones forestales del género *Pinus* spp en el área de estudio.

Especie	Municipio	Año de plantación	Espaciamiento	Contenedor	Coordenadas	Altitud msnm
<i>P. patula</i>	Zapatoca	2000	3x3 m	Pellet Jiffy*	6°50'17.80"N 73°18'27.54"O	2.115
<i>P. tecunumanii</i>	Zapatoca	2013	3x3 m	Pellet Jiffy	6°48'38.34"N 73°16'34.86"O	1.695
<i>P. maximinoi</i>	Zapatoca	2013	3x3 m	Pellet Jiffy	6°47'19.21"N 73°17'0.24"O	1.820
<i>P. patula</i>	Cerrito	2000	3x3 m	Bolsa	6°48'50.93"N 72°40'24.33"O	2.778
<i>P. maximinoi</i>	Málaga	2014	3x3 m	Pellet Jiffy	6°44'16.73"N 72°43'44.19"O	2.441
<i>P. patula</i>	Málaga	2010	3x3 m	Pellet Jiffy	6°42'29.66"N 72°45'13.05"O	2.770

* Pellet Jiffy corresponde al contenedor empleado para la propagación de la especie, fabricado con turba *Sphagnum*, envuelta en una muy fina malla biodegradable.

**Figura 1.** Localización de sitios de muestreo en los municipios de Zapatoca, Cerrito y Málaga, del departamento de Santander, Colombia.

Muestreo y Métricas de Campo

Los trabajos de campo se desarrollaron durante el segundo semestre de 2024 y el primer semestre de 2025. En este periodo se establecieron unidades de muestreo correspondientes a parcelas circulares de 6 m de radio, de acuerdo con la metodología propuesta por (Murillo & Camacho, 1997). El número de parcelas

implementadas en cada plantación se ajustó para obtener una intensidad de muestreo del 10 % del área total, garantizando así una adecuada representatividad y variabilidad.

Previo a establecer las parcelas, se realizaron ajustes en campo para corrección de pendiente y para disminuir el efecto borde al distribuir las unidades de muestreo dentro de las plantaciones. Las variables seleccionadas y la escala de valoración utilizada para evaluar la calidad de la madera en la zona de estudio se presentan en el **Cuadro 2**, y fueron adaptadas de la propuesta de (Murillo & Camacho, 1997). A partir de los registros de campo, se construyó un índice general de calidad de madera (IGCM), generado de los valores medios del conjunto de variables para cada árbol, que permitió cuantificar esta métrica para cada una de las especies como insumo descriptivo, empleando la **Expresión (1)**. Adicionalmente, se incluyeron el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) como variables complementarias para los análisis.

Cuadro 2. Variables fenotípicas para evaluar la calidad de la madera de especies del género *Pinus* spp en Santander, Colombia.

Variable (Sigla)	Imagen	Descripción	Métricas
Ramificación basal (Rb)		Ramificación presentada por un árbol a menos de 1,3 metros de altura del fuste.	1: Tres o más ramificaciones. 2: Dos ramificaciones. 3: Sin ramificación.
Inclinación (In)		Ángulo de desviación del fuste principal, respecto a la vertical; asociado con torcedura.	1: Ángulo > 30°. 2: Ángulo entre 10° y 30°. 3: Ángulo < 10°.
Rectitud de fuste (Rf)		Grado de curvatura del fuste principal.	1: Fuste muy curvado. 2: Fuste con curvatura leve. 3: Fuste recto.

Daño
Mecánico
(Dam)



Lesiones físicas en el árbol causadas por manejo, transporte o factores externos.

- 1: Daño severo.
- 2: Daño leve.
- 3: Sin daño.

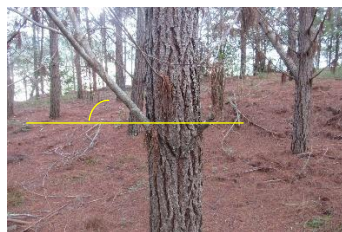
Grosor Rama
(Gr)



Diámetro en centímetros de las ramas ubicadas en el tercio inferior de la copa del árbol.

- 1: > 10 cm de diámetro.
- 2: Entre 5 y 10 cm de diámetro.
- 3: < 5 cm de diámetro.

Ángulo rama
(Ar)



Ángulo de inserción de las ramas en el fuste principal, tomando como plano horizontal el nivel del suelo.

- 1: Mayor a 60°
- 2: Entre 30° y 60°
- 3: Menor a 30°

Número de
trozas
(Nt)



Número de trozas de tres metros de largo, posibles de obtener desde el fuste del árbol.

- 1: Una sola troza de 3 m
- 2: Dos trozas de 3 m
- 3: Tres trozas de 3 m

Reiteración
(Re)



Distanciamiento
verticilos entre

- 1: Corto e irregular distanciamiento entre ramas
- 2: Moderado distanciamiento entre ramas
- 3: Optimo distanciamiento entre ramas

Espiralamiento
del fuste (Ef)



Grado de incidencia del crecimiento, en forma de espiral del fuste principal.

- 1: Giros marcados en el tallo
- 2: Giros moderados en el tallo
- 3: Sin giros en el tallo

(Fuente: Adaptado de Murillo & Camacho, 1997)

$$IGCM = \frac{\sum V_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

V_i = Promedio de la variable i en cada árbol
 n = Total de variables evaluadas

Análisis Estadístico

El tratamiento estadístico de los datos incluyó inicialmente análisis descriptivos para el conjunto de variables evaluadas. Considerando la naturaleza ordinal de la escala de valoración utilizada y el incumplimiento de supuestos de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis (p -value <0,05), para identificar niveles de significancia por municipios y especies, y seguido se aplicó la prueba *post hoc* de Dunn, con el fin de identificar diferencias significativas entre grupos para estos dos factores. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de componentes principales para variables categóricas (CATPCA, por la sigla en inglés de *categorical principal components analysis*) con el propósito de explorar patrones de asociación entre las variables evaluadas. Todos los procesamientos estadísticos fueron construidos en el entorno RStudio (R Core Team, 2026) mediante los paquetes especializados *dplyr*, *FSA*, *Homals* y *ggplot2*.

RESULTADOS

Análisis Descriptivo de los Atributos de Calidad de Madera

El análisis exploratorio inicial de las variables evaluadas reveló tendencias diferenciadas en los atributos de calidad de la madera dentro de la región de estudio. En términos generales, no se observó un predominio absoluto de valoraciones óptimas en las plantaciones evaluadas. Sin embargo, variables como ramificación basal, rectitud y espiralamiento del fuste e inclinación presentaron los mayores porcentajes en la categoría de valoración más alta (**Cuadro 3**). En la categoría intermedia de evaluación, un conjunto de cinco variables agrupó las valoraciones más altas, donde destacaron las variables número de trozas, reiteración y ángulo de rama con las mayores frecuencias relativas. Por otro lado, dentro de la categoría de menor valoración, únicamente la variable reiteración presentó una proporción representativa de individuos en condición no favorable.

Cuadro 3. Distribución porcentual de atributos de calidad de madera en especies del género *Pinus*.

Variable	Escala de valoración		
	1 (%)	2 (%)	3 (%)
Ramificación basal	0,48	3,92	95,60
Inclinación	2,46	18,29	79,25
Rectitud de fuste	4,74	29,79	65,47
Daño Mecánico	16,61	45,68	37,71
Grosor Rama	17,65	49,22	33,12
Ángulo rama	24,73	51,10	24,17
Número de trozas	21,30	52,31	26,40
Reiteración	25,21	62,44	12,34
Espiralamiento del fuste	0,52	4,84	94,64

Nota: Los porcentajes fueron estimados a partir de un n=927 individuos registrados en la fase de campo.

Por último, la estimación de área basal (AB) en m² permitió confrontar el desarrollo y crecimiento. Además, se incluyó la altura total de los árboles de cada especie, en cada localidad. Respecto a estos parámetros dasométricos, en general, no se observó un patrón homogéneo ni por especie ni por municipio, situación que se refleja en los valores medios señalados en las **Figuras 2A y 2B**. Al contrario de lo que ocurre con la variable altura total, donde no se evidencia un patrón diferenciador, en el caso del área basal se observa que *P. maximinoi* y *P. patula* se diferencian claramente de *P. tecunumanii*; los primeros, con valores de área basal individual promedio por árbol superiores a 0,15 m², son un 44 % superiores a lo observado en *P. tecunumanii*. El análisis por municipio destacó a Málaga, con un área basal de 0,27 m²/árbol, la que supera a Zapatoca en un 60 %; respecto a la altura, lo observado para los municipios fue similar a lo revelado por especie.

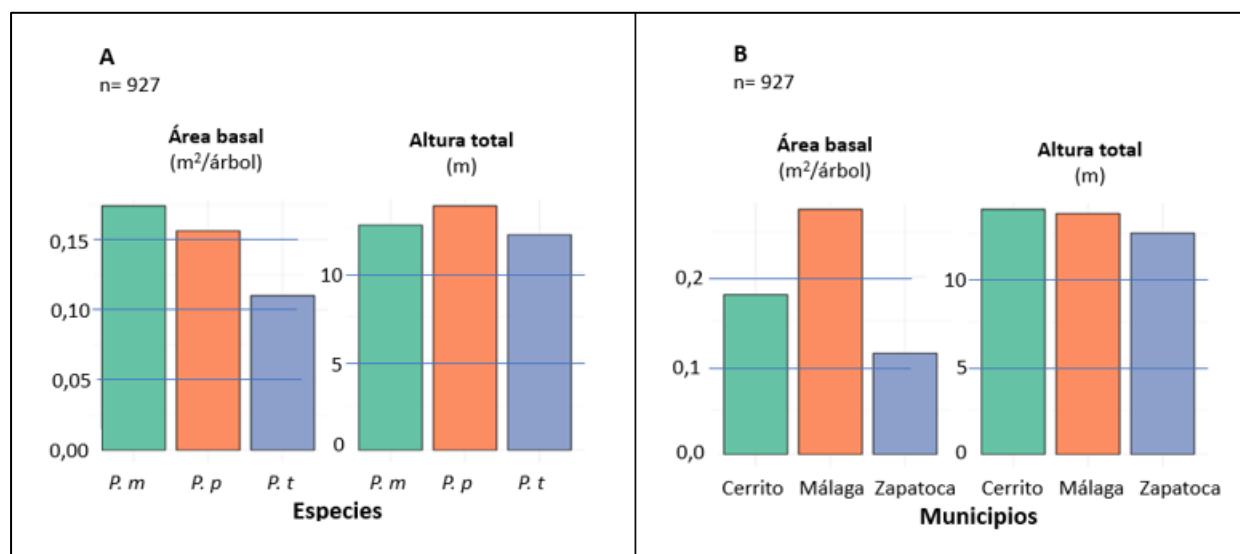


Figura 2. Valores medios de área basal (m²/árbol) y altura total (m) según especies (A) y municipios (B).
(*P. m* = *Pinus maximinoi*; *P. t* = *P. tecunumanii*; *P. p* = *P. patula*)

Comparación del Índice General de Calidad de la Madera en Pie entre Especies y Municipios

Entre especies, el análisis de *Kruskal–Wallis* reveló diferencias significativas en el IGCM (*p-value* < 0,001). La prueba *post hoc* de *Dunn* mostró diferencias significativas entre todos los pares de comparación. Los mayores valores promedio se registraron en *P. maximinoi* (2,4) y *P. patula* (2,3), mientras que *P. tecunumanii*

presentó el menor valor promedio del índice; incluso con reportes de valoración del índice desde 1.0. En términos generales, esta última especie evidenció una tendencia hacia calificaciones inferiores de calidad de la madera, ubicándose por debajo del nivel intermedio de valoración del IGCM (**Figura 3A**).

A nivel de municipios, el análisis del IGCM basado en las comparaciones múltiples de *Dunn*, evidenció la formación de dos grupos estadísticamente diferenciados. Por un lado, los municipios de Cerrito y Málaga no presentaron diferencias significativas entre sí, mostrando valores medios similares del índice. Por otro lado, Zapatoca registró valores significativamente inferiores de IGCM, diferenciándose de ambos municipios. Estos resultados indican una tendencia hacia una menor calidad de madera en los individuos evaluados en Zapatoca en comparación con los procedentes de Cerrito y Málaga (**Figura 3B**).

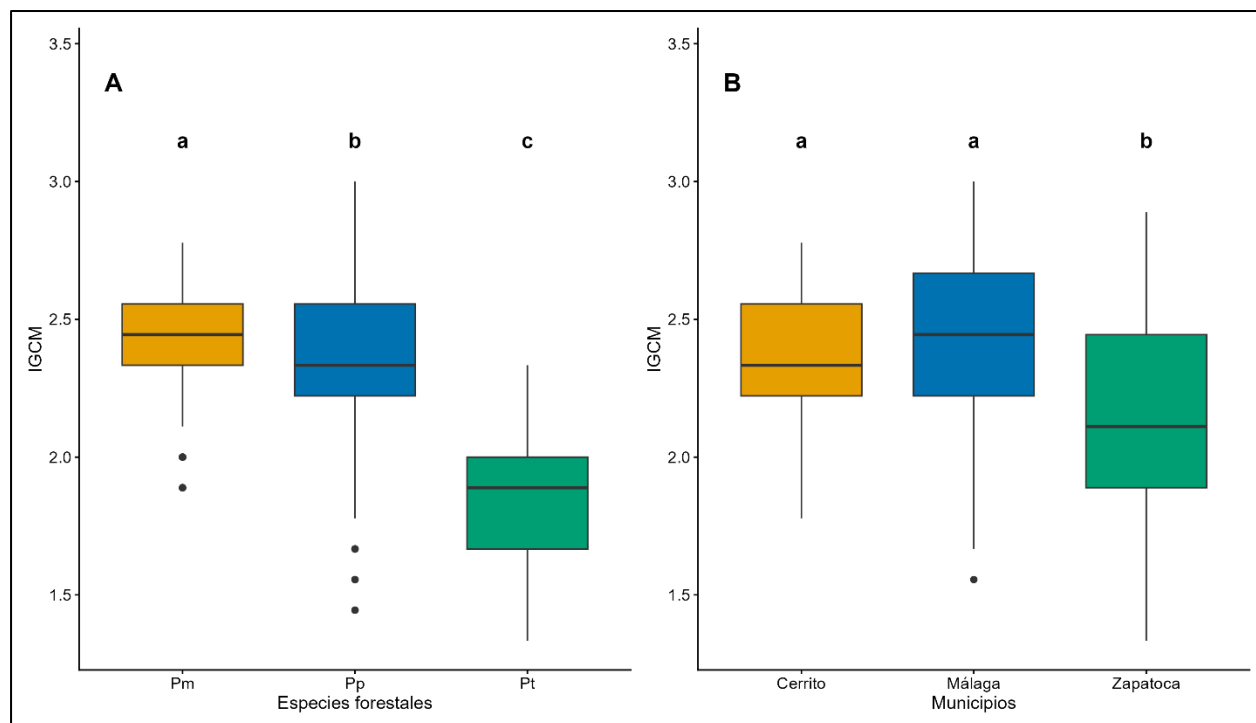


Figura 3. Comparación del Índice General de Calidad de Madera (IGCM) entre especies forestales (A) y municipios de estudio (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p -value < 0,05). (*P. m* = *Pinus maximinoi*; *P. t* = *P. tecunumanii*; *P. p* = *P. patula*).

Estructura Multivariada de las Variables de Calidad de Madera

El análisis CATPCA permitió explorar la estructura multivariada de los atributos de calidad de la madera evaluados en las especies de *Pinus* estudiadas. Las dimensiones 1 y 2 presentaron autovalores de 0,0150 y 0,0168 respectivamente, evidenciando una baja dispersión general de los datos y una alta concentración de observaciones en categorías similares de calidad. La contribución de las variables a la configuración de los ejes mostró patrones diferenciados (**Figura 4A**). En la primera dimensión destacaron los atributos relacionados con grosor de rama (Gr), ángulo de rama (Ar) y reiteración (Re), mientras que la segunda dimensión estuvo principalmente asociada con número de troza (Nt), inclinación (In), daño mecánico (Dam) y rectitud de fuste (Rf). En contraste, la ramificación basal (Rb) y espiralamiento del fuste (Ef) presentaron una menor contribución relativa a la estructura multivariada observada.

La distribución de los individuos por especie reveló un amplio solapamiento en el espacio definido por las dos primeras dimensiones (**Figura 4B**), lo que indica una respuesta similar de los atributos de calidad evaluados. No obstante, se observaron tendencias de agrupamiento que sugieren diferencias en la

expresión conjunta de algunas variables entre las especies, particularmente en aquellos asociados con la primera dimensión. De manera similar, la representación por municipio mostró una elevada superposición entre localidades (**Figura 4C**), lo que indica que las áreas de estudio evaluadas compartieron patrones generales de calidad de madera. Sin embargo, la dispersión observada en cada municipio evidencia variabilidad intralocal o intraespecífica, que podría estar vinculada a factores de sitio, entre ellos: el rango altitudinal (2.441-2.778 msnm, Málaga-Cerrito); el manejo o desarrollo individual de los árboles en los estadios iniciales de crecimiento, debido a los distintos contenedores (pellets y bolsas) que se usaron para producir sus plantas; y los periodos de siembra de los árboles plantados.

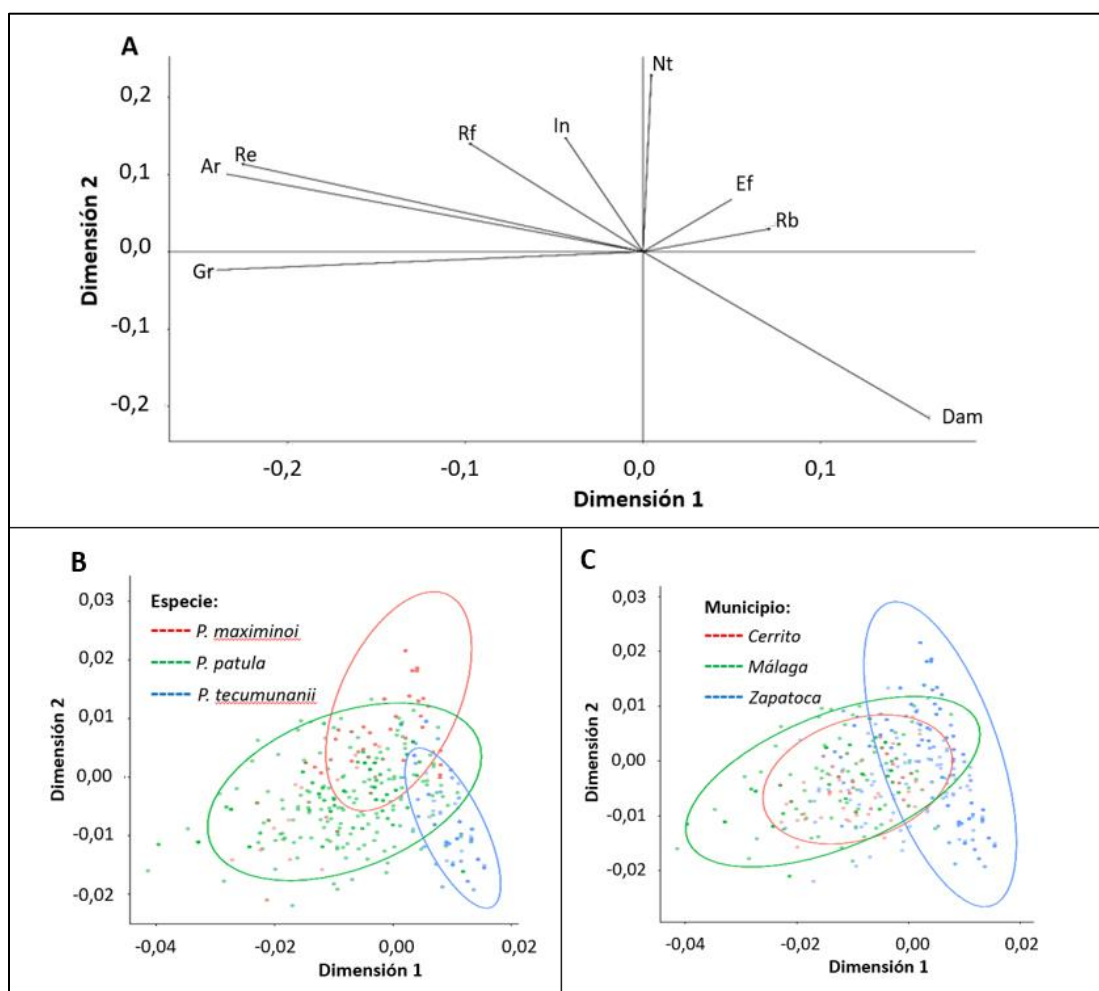


Figura 4. Representación multivariada de los atributos de calidad de madera mediante análisis CATPCA. (A) Contribución de las variables evaluadas, (B) distribución de individuos por especie y (C) distribución de individuos por municipio.

DISCUSIÓN

La calidad observada de la madera en pie indica que las especies de pino empleadas en los procedimientos de reforestación exhiben respuestas distintas en los atributos evaluados en la presente investigación. Este comportamiento estaría asociado inicialmente a características genéticas propias de cada especie, así como a las condiciones edáficas y al manejo silvicultural implementado durante el ciclo productivo de las plantaciones (Schimleck *et al.*, 2018; Castor *et al.*, 2024). Tradicionalmente, las evaluaciones de calidad de madera en coníferas se han desarrollado sobre material aserrado, posterior al aprovechamiento forestal,

considerando principalmente propiedades derivadas de la anisotropía de la madera, diámetros con y sin corteza, y grosor de tabla, entre otros (Rascón-Solano *et al.*, 2023). No obstante, este enfoque puede generar para los reforestadores menores ganancias al momento de comercializar la madera, debido a que la valoración se realiza a criterio del comprador a partir de una transformación inicial.

La valoración de calidad de la madera a partir de variables como daño mecánico, grosor de rama, ángulo de rama, número de trozas y reiteración reveló un panorama subóptimo para los propietarios de las plantaciones forestales evaluadas. Este subconjunto de atributos presentó valoraciones intermedias dentro de la escala empleada, lo que, coincidiendo con lo informado por Corvalán (2020), pone de manifiesto individuos multinodales, con posibles deficiencias de carácter silvicultural durante el periodo de desarrollo de las plantaciones. Estos resultados sugieren además implicaciones negativas sobre la proyección productiva de los rodales, debido a que tales atributos pueden limitar el crecimiento sostenido y la conformación estructural de los individuos. Este comportamiento fue igualmente consistente con los valores promedio de área basal registrados en el estudio, resultados que coinciden con lo reportado por Medrado *et al.* (2023), quienes destacan la importancia del manejo silvicultural en la producción de madera de calidad en proyectos forestales.

El IGCM mostró una mayor variabilidad entre especies que entre municipios. En este contexto, *P. tecunumanii* presentó las menores puntuaciones del índice, comportamiento que podría explicarse parcialmente por tratarse de una especie de incorporación más reciente en los programas de reforestación de la zona. Lo anterior también sugiere que aún no existe un patrón completo de adaptación a las condiciones de oferta ambiental presentes en las áreas evaluadas. Los valores obtenidos para el índice también podrían estar asociados a intervenciones silviculturales tardías o insuficientes, particularmente en actividades como poda de formación, práctica que Miao *et al.* (2025) reportan como fundamental para mejorar la calidad maderera de las plantaciones de especies del género *Pinus*. En esta misma línea, retrasos en las intervenciones silviculturales podrían explicar el comportamiento observado en *P. maximinoi*, especie para la cual se han reportado diámetros de rama no superiores a 2 cm, como valores ideales para la obtención de madera de calidad en plantaciones forestales de países centroamericanos como Guatemala (INAB, 2017). Estudios en *P. patula*, efectuados por Escobar-Sandoval *et al.* (2018) en México, reportan diámetros de rama de 2,4 hasta 7,3 cm en plantaciones de 8 años, establecidas a 2,5 x 2,5 m de distanciamiento, un patrón de plantación que pudo explicar tal respuesta, pero que dista de las características de establecimiento y tiempo de siembra acá evaluado. Sin embargo, en la presente investigación, dichos valores no fueron superados en la gran mayoría, situación que posiblemente contribuyó a un IGCM promedio de 2,5 para estas especies.

El análisis multivariado implementado en el estudio reveló la incidencia diferencial de algunos atributos sobre la calidad de la madera en pie. Específicamente, variables como grosor de rama, ángulo de rama y reiteración presentaron una mayor contribución a la estructura multivariada observada, explicando en gran proporción la variabilidad del IGCM registrado entre individuos y especies. Estos resultados validan la importancia de las intervenciones silviculturales orientadas al control de la carga vegetal que conforma la copa de los árboles plantados durante el turno proyectado, aspecto que Pastor-Martínez *et al.* (2024) destacan como importante de realizar en el primer tercio de fuste, donde demostraron efectos positivos para la producción de madera de calidad en especies de coníferas como las acá evaluadas. Asimismo, la asociación observada entre reiteración y ángulo de la rama sugiere un incremento en la formación de nudos muertos en la madera, condición que afecta las propiedades mecánicas y, por ende, su valor comercial (Wang *et al.*, 2025). Estos resultados evidencian posibles deficiencias en el manejo silvicultural de las plantaciones evaluadas, situación que podría explicar los retrasos en el crecimiento sostenido de los individuos, comportamiento igualmente consistente con los valores de área basal estimados, los que se consideran bajos para la edad y las especies evaluadas.

Finalmente, los análisis multivariados realizados a nivel de especies y municipios no evidenciaron patrones claramente diferenciados respecto a la calidad de la madera en la región evaluada. En este sentido, los atributos analizados mostraron comportamientos similares entre las especies de coníferas y las localidades donde fueron establecidas las plantaciones, lo que sugiere la existencia de factores comunes asociados al desarrollo de los rodales. Estos resultados podrían indicar limitaciones en la implementación de criterios

técnicos de manejo silvicultural dentro de los predios evaluados, aspecto que posiblemente influyó sobre la expresión homogénea de los atributos de calidad registrados en esta investigación.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad de la madera debería constituir una práctica transversal durante el ciclo productivo de plantaciones forestales establecidas con especies de rápido crecimiento, como las coníferas del género *Pinus*. El desarrollo de esta investigación demostró que el conjunto de variables seleccionadas representa una herramienta útil para describir el estado de la madera en pie en plantaciones localizadas en municipios de Santander, Colombia, donde fueron evaluadas plantaciones de *P. patula*, *P. maximinoi* y *P. tecunumanii*, especies para las cuales existe limitada información silvicultural en la región. Las métricas de calidad obtenidas se consolidan como un referente regional para fortalecer la toma de decisiones en la administración forestal, resaltando la importancia del manejo silvicultural sobre la producción de madera de calidad. Asimismo, el estudio evidenció que la calidad de la madera puede ser estimada mediante un índice general que integra atributos relevantes asociados a la obtención de productos maderables con características óptimas para mercados locales y regionales.

Finalmente, el análisis multivariado permitió establecer una aproximación al comportamiento de las especies forestales evaluadas y al estado actual de la calidad de la madera en pie en los municipios seleccionados. No obstante, los resultados obtenidos no deben asumirse únicamente como información base, sino como un insumo técnico para que reforestadores y productores forestales puedan alcanzar un óptimo desarrollo y crecimiento de nuevas plantaciones. De esta manera, la gestión forestal podrá incorporar herramientas metodológicas dirigidas a incrementar la productividad, optimizar la calidad de las plantaciones y fortalecer la cadena de valor forestal de las coníferas en los Andes de Colombia, donde se han constituido como una fuente importante de madera a nivel nacional.

AGRADECIMIENTOS

A los propietarios de fincas en los municipios de estudio, y especialmente al Dr. Carlos Mantilla en Zapatoca, quien durante años facilitó el ingreso a las plantaciones para llevar a cabo prácticas académicas. Además, a los estudiantes del curso Viveros y Plantaciones del programa de Ingeniería Forestal 2024 de la Universidad Industrial de Santander, por su contribución en la colecta de datos en campo.

REFERENCIAS

- Castor, T., dos Santos, V., de Souza, M., Marques, N., Schumacher, M., Stape, J. & Baptista, G. (2024). The impact of age and forestry practices on the wood quality of *Pinus taeda* L. grown in different sites in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 562. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121898>
- Corvalán, P. (2020). Consideraciones silvícolas para la producción de postes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(2): 375-391.
- Cuellar, J. & Ramos, H. (2023). Manejo silvicultural de plantaciones maderables para mejorar la calidad de la madera. Instituto Regional de Desarrollo, Universidad Nacional La Molina. Lima, Perú.
- Escobar-Sandoval, M., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S. & Borja-de la Rosa, A. (2018). Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y bosques*, 24(2), e2421595. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), (2025). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2025. Roma. 214 pp. <https://doi.org/10.4060/cd6709es>
- FEDEMADERAS (Federación Nacional de Industriales de la Madera), (2025). Boletín estadístico forestal. Bogotá. Colombia.

- INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2017). Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H.E. Moore); paquete tecnológico forestal. Guatemala. 37 p.
- Medrado, P., de Resende, A., Tavares, N., Torres, C., Alves, D., Camargo, C., Sverzut, H. *et al.* (2023). Potential native timber production in tropical forest restoration plantations. Perspectives in Ecology and Conservation, N° 21. Pp: 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.002>
- Miao, Z., Zhao, X., Jiang, Y., Dong, L. & Li, F. (2025). Survival modeling of branch-knot developmental dynamics in Korean Pine plantations: Linking climate, region, and artificial pruning. Forest Ecology and Management, 597, 123160. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123160>
- Murillo, O. & Camacho, P. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas. Agronomía Costarricense, 21(2): 189-206.
- Murillo, O., Padilla, M. & Jara, H. (2025). Evaluación de la plantación forestal. Costa Rica.
- Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D. & Herbohn, J. (2014). Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. Forest Ecology and Management, N° 334. Pp:106-113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>
- Orozco, R., Hernández, J., Nájera, J., Domínguez, P., Goche, J., López, P. & Corral, J. (2016). Rendimiento en calidad de la madera aserrada de pino. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(36): 37-50. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000400037
- Pastor-Martínez, U., Velázquez-Martínez, A. & Gil-Vera, J. (2024). Efecto de podas en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en el ejido Llano Grande, Chignahuapan, Puebla. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 30(1): rrchscfa202210077. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.077>
- PROFOR (Programa sobre los bosques). (2017). Situación actual y potenciales de fomento de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Bogotá, Colombia
- R Core Team (2026). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rascón-Solano, J., Aguirre-Calderón, O., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. & Nájera-Luna, J. (2023). Rendimiento y distribución de clases de madera aserrada de pinos del norte de México. Colombia Forestal, 26(2): 60-76. <https://doi.org/10.14483/2256201X.20082>
- Schimleck, L., Antony, F., Dahlen, J. & Moore, J. (2018). Wood and Fiber Quality of Plantation-Grown Conifers: A Summary of Research with an Emphasis on Loblolly and Radiata Pine. Forests, 9(6): 298. <https://doi.org/10.3390/f9060298>
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C. & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. Bosque, 37(1): 71-84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100008>
- UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria). (2018). Lineamientos de política: Plantaciones forestales con fines comerciales para la obtención de madera y su cadena productiva. Bogotá. https://upra.gov.co/sites/default/files/2025-07/201802_lineamientos.pdf
- Valdés, R., Alvarez, D. & Fernández, R., (2021). Análisis de la calidad superficial de diferentes maderas. Avances, 23(2): 163-174.
- Vignote, S., Martínez-Rojas, I., & Villasan, A. (s.f). Silvicultura y calidad de madera. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Economía y Gestión Forestal Santiago
- Wang, P., Liu, G., Li, F., Li, S., Milani, G. & Abruzzese, D. (2025). Assessment of Knot-Induced Degradation in Timber Beams: Probabilistic Modeling and Data-Driven Prediction of Load Capacity Loss. Buildings, 15, 2058. <https://doi.org/10.3390/buildings15122058>



APUNTE

La apicultura como herramienta de desarrollo en pueblos originarios del sur de Chile.

Andrea Álvarez Contreras^{1*} ; Xiomara Gélvez Peláez² ; Eduardo Molina Rademacher²; Marta García Ortega¹  & Patricio Chung Guin-po³ .

¹ Instituto Forestal, sede Metropolitana. Santiago, Chile. aalvarez@infor.cl; mgarcia@infor.cl

² Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. xgelvez@infor.cl; emolina@infor.cl.

³ Instituto Forestal, sede Biobío. Concepción, Chile. pchung@infor.cl.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.650>

Recibido: 18.12.2025; Aceptado 08.01.2026.

RESUMEN

La apicultura es reconocida internacionalmente por su aporte a la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y el desarrollo rural. En el caso chileno, se destaca por una alta diversidad florística, un estatus sanitario favorable y una estructura productiva dominada por pequeños y medianos productores. La miel, como Producto Forestal No Maderero (PFNM), adquiere especial relevancia cuando se produce en ecosistemas con vegetación nativa, aportando valor agregado por su origen botánico y territorial. Aunque la apicultura no es una práctica ancestral indígena, su adopción en contextos mapuches puede entenderse como una forma de hibridación cultural, donde el conocimiento ecológico tradicional se combina con prácticas productivas modernas. Este proceso permite formas de desarrollo coherentes con los valores de respeto por el territorio, la biodiversidad y la espiritualidad indígena. En conclusión, la apicultura ofrece una oportunidad concreta para pueblos originarios si se promueve desde un enfoque territorial, intercultural y sustentable, reconociendo la estrecha relación entre bosque, biodiversidad, saberes tradicionales y autonomía local.

Palabras clave: Apicultura, productos forestales no madereros (PFNM), pueblos originarios, cosmovisión indígena, bosque nativo.

SUMMARY

Apiculture is internationally recognized for its contribution to food security, biodiversity conservation, and rural development. In Chile, it stands out due to its rich floristic diversity, favorable sanitary status, and a productive structure dominated by small and medium-sized producers. Honey, as a Non-Wood Forest Product (NWFP), gains particular relevance when produced in ecosystems with native vegetation, offering added value through its botanical and territorial origin. Although apiculture is not an ancestral indigenous practice, its adoption in Mapuche contexts can be understood as a form of cultural hybridization, where traditional ecological knowledge merges with modern productive practices. This process enables development pathways aligned with values of territorial respect, biodiversity, and indigenous spirituality. In conclusion, apiculture represents a concrete opportunity for indigenous peoples when promoted through a territorial, intercultural, and sustainable approach that recognizes the close relationship between forest, biodiversity, traditional knowledge, and local autonomy.

Key words: Apiculture, non-wood forest products (NWFP), indigenous people, traditional knowledge, native forest

INTRODUCCIÓN

La apicultura es una actividad que trasciende la simple producción de miel. En Chile se ha consolidado como una herramienta estratégica para el desarrollo rural, la diversificación productiva y la conservación de la biodiversidad, especialmente en contextos de pequeña agricultura y pueblos originarios. Los bosques, entendidos como socioecosistemas donde confluyen dimensiones sociales, ecológicas, políticas y



culturales (Berrouet *et al.*, 2018), constituyen el hábitat principal de las especies vegetales melíferas que sustentan la actividad apícola. Así, la producción apícola no solo depende de factores biológicos, sino también de decisiones humanas vinculadas al uso y manejo del territorio (Haines-Young & Potschin, 2010; Reyes *et al.*, 2020).

En este marco, la apicultura se presenta como una práctica con potencial de articulación entre conocimiento técnico y saberes locales, permitiendo a comunidades campesinas e indígenas integrar esta actividad a sus modelos de desarrollo. Aunque la especie *Apis mellifera* es introducida y, por tanto, la apicultura no forma parte de la tradición ancestral de los pueblos originarios de Chile, las comunidades han adoptado esta actividad de forma progresiva, resignificándola en coherencia con sus cosmovisiones y formas de relación con el bosque. El caso del abejorro nativo *Bombus dahlbomii*, considerado sagrado por el pueblo mapuche, ilustra esta visión integradora entre biodiversidad, memoria e identidad (Montalva *et al.*, 2020).

En el presente documento se abordan los principales aspectos de la apicultura en Chile, incluyendo su origen histórico, su reconocimiento como Producto Forestal No Maderero (PFNM) y su expansión actual en contextos indígenas. A partir de un enfoque técnico y sociocultural, se examina el estado de la actividad a nivel nacional, los marcos normativos y sanitarios que la regulan, y las especies vegetales nativas de importancia apícola, destacando su valor no solo productivo, sino también medicinal y simbólico. El documento se propone como una contribución a la reflexión sobre cómo una actividad moderna, como la apicultura, puede integrarse en territorios indígenas de forma respetuosa, sustentable y con identidad.

LA MIEL COMO PRODUCTO FORESTAL NO MADERERO (PFNM)

La miel, en tanto resultado del trabajo de las abejas sobre los recursos florales del bosque, es reconocida internacionalmente como un Producto Forestal No Maderero (PFNM). Esta categoría agrupa a aquellos bienes de origen biológico que se obtienen del bosque sin necesidad de talarlo, e incluye frutos, hongos, resinas, plantas medicinales, fibras, y productos apícolas como la miel (FAO, 2025). Sin embargo, su valoración ambiental, económica y cultural depende del contexto territorial y de las relaciones que las comunidades mantienen con su entorno natural.

Tanto la miel, como los productos que se obtienen de la apicultura (miel, polen, propóleo, cera, abejas reinas), son considerados PFNM, principalmente debido a que las abejas melíferas (*Apis mellifera*), en gran parte, obtienen de los ecosistemas boscosos, formaciones xerofíticas, zonas aledañas a los bosques y árboles aislados, la materia prima necesaria para producir o recolectar estos productos (polen, propóleo y mielato) (FAO, 1996; Rozman *et al.*, 2022; Chamorro-García, 2013), y elaboran en sus colmenas en base a los productos obtenidos la miel, cera y abejas reinas (FAO, 1999; Gutiérrez, 2017; Cuevas *et al.*, 2021).

Tal como señalan estudios recientes sobre la sociología del bosque nativo (Reyes *et al.*, 2020), los PFNM no deben comprenderse únicamente desde su capacidad de generar ingresos, sino desde la forma en que se insertan en los modos de vida, cosmovisiones y prácticas locales. En comunidades campesinas y de pueblos originarios, la miel puede representar mucho más que un bien comercial: es una forma de relacionarse con el bosque de manera respetuosa, siguiendo los ciclos de la naturaleza, cultivando saberes tradicionales y valorando la biodiversidad local.

Un hito relevante en la valorización de la miel como PFNM en Chile fue la primera certificación de origen forestal sostenible PEFC¹, otorgada en 2020 a un grupo de seis apicultores de la Región del Biobío. Esta certificación se logró gracias a un proyecto colaborativo entre empresas y apicultores, quienes instalaron sus apiarios en predios con bosques nativos y plantaciones certificadas. El sello PEFC garantiza trazabilidad, origen natural, ausencia de químicos y responsabilidad ambiental y social. Se trata de la primera vez en Chile que un PFNM alcanza este estándar de producción sostenible, lo que abre oportunidades de comercialización en mercados exigentes como Europa, Estados Unidos y Asia (PEFC, 2020).

¹ Sigla en inglés del Programa para el Reconocimiento de la Certificación Forestal. Organización internacional no gubernamental y sin fines de lucro, dedicada a promover la gestión forestal sostenible a través de la certificación de tercera parte independiente.

Los apicultores han destacado el valor agregado que esta certificación otorga: acceso a predios forestales, ordenamiento de sus procesos productivos, auditorías técnicas, y un producto final con respaldo institucional. Según el análisis botánico realizado por INFOR y la Pontificia Universidad Católica de Chile, la miel certificada contiene porcentajes significativos de floración nativa y exótica, variando según la ubicación de los apiarios. Esta diversidad floral no solo mejora el sabor y calidad del producto, sino que valora la relación entre apicultura, paisaje y bosque nativo (PEFC, 2020.).

Según SAG (2024), Chile cuenta con 11.583 apicultores/as registrados/as hasta septiembre de 2023; de ellos, el 77 % corresponde a productores de pequeña escala, es decir, aquellos con hasta 50 colmenas. La Región del Biobío concentra 1.415 apicultores/as, lo que equivale aproximadamente al 12,2 % del total nacional, y cuenta con más de 111.000 colmenas. En esta región, el 55,3 % de las colmenas realiza apicultura trashumante, práctica que se extiende al 65,9 % del total nacional debido a la limitada disponibilidad de flora melífera en ciertas temporadas. Respecto al comercio internacional, más del 92 % de la miel chilena se exporta, consolidándose como un producto altamente demandado en mercados internacionales (SAG, 2024). Alemania es el principal país de destino, seguido por Francia, Reino Unido, Estados Unidos e Italia.

El documento *Mieles chilenas para el mundo* (Montenegro, 2023) destaca que Chile produce mieles monoflorales de alto valor, como las de ulmo, quillay, tiaca, corcolén, tineo, arrayán y otras, caracterizadas por su identidad botánica y territorial, lo que representa una oportunidad para posicionar al país como productor de miel diferenciada en origen y calidad.

En este contexto, se refuerza la importancia de avanzar hacia modelos de producción sostenibles y certificados, que reconozcan el origen botánico, ecológico y territorial de la miel, en sintonía con estrategias de valorización, como las indicaciones geográficas y los productos con identidad biocultural, especialmente en zonas donde comunidades indígenas practican la apicultura.

Por su parte, iniciativas impulsadas por CONAF y gobiernos locales han comenzado a integrar la apicultura dentro de estrategias de restauración ecológica. Un ejemplo emblemático es el de la comuna de Panguipulli, en la Región de Los Ríos, donde terrenos degradados han sido rehabilitados mediante la instalación de núcleos melíferos con especies nativas. Estas unidades, protegidas del ingreso de ganado, incluyen árboles como ulmo, arrayán, notro y meli, que en pocos años ofrecen sombra, alimento para las abejas y materia prima para la producción de miel. Agricultoras que cosechan hasta 2.000 kilos anuales, vendiendo directamente a turistas, lo que demuestra el potencial de esta actividad para la diversificación de ingresos, la recuperación de suelos y la revalorización del bosque (Terram, 2015).

A nivel técnico, el Instituto Forestal ha desarrollado líneas de investigación sobre huertos melíferos con especies forestales nativas, orientados a la Agricultura Familiar Campesina. Estos huertos cumplen una doble función: apoyar la actividad apícola mediante floración constante y, simultáneamente, recuperar ecosistemas boscosos deteriorados, respetando la biodiversidad y los saberes territoriales. Especies como ulmo, tiaca, tineo, quillay y avellano han sido identificadas como altamente melíferas, y muchas de ellas están en alguna categoría de amenaza, lo que refuerza su valor ecológico y cultural.

Así, la miel como PFNM, emerge como una alternativa productiva de alta relevancia, con capacidad de generar ingresos, restaurar territorios y reforzar identidades locales. Cuando se articula con principios de sostenibilidad, soberanía alimentaria y justicia ambiental, la apicultura deja de ser una práctica marginal para convertirse en un puente entre el bosque vivo y la economía de futuro.

RELACIÓN ENTRE APICULTURA Y PUEBLOS ORIGINARIOS

La apicultura, tal como la conocemos actualmente, no formaba parte de los saberes tradicionales de los pueblos originarios de Chile, ya que la abeja europea (*Apis mellifera*) fue introducida en el país recién en 1844 (Cuevas et al., 2021). Sin embargo, esto no significa que no haya existido una relación previa con elementos clave del entorno natural, como las especies vegetales nativas que hoy sustentan la producción apícola.

Las comunidades indígenas han mantenido históricamente una relación profunda con el bosque y sus ciclos naturales. Desde su cosmovisión, el bosque no se percibe únicamente como una fuente de recursos, sino como un espacio vivo, con dimensiones espirituales, medicinales y culturales. Las especies nativas de alto valor melífero como el ulmo, canelo, tineo o arrayán, han sido tradicionalmente valoradas por su *newen* (energía vital), sus propiedades curativas y su rol dentro del equilibrio natural (Cea, 2023).

En este contexto, la apicultura puede adquirir un nuevo significado cuando se integra armónicamente con estas formas de comprensión del entorno. Tal como señalan Reyes *et al.* (2020), las comunidades mapuches no solo habitan el bosque; lo hablan, lo escuchan y lo defienden, por lo que, lejos de ser solo una técnica productiva, se convierte en una práctica que puede dialogar con los valores del *az mapu* (orden territorial) y del *küme mogen* (vivir bien en armonía con la naturaleza), al desarrollarse en coherencia con el respeto a los ciclos ecológicos, a la flora nativa y a las formas de vida tradicionales.

Incorporación Progresiva y Resignificación Cultural

Durante el siglo XX, y especialmente en las últimas décadas, comunidades mapuche, huilliche, lafkenche y pewenche han comenzado a incorporar la apicultura como una actividad productiva complementaria a pequeña escala. En muchos casos, esta práctica se ha integrado a procesos de fortalecimiento de la economía familiar y del desarrollo local, permitiendo generar ingresos mediante la elaboración de un producto natural de calidad, respetuoso del entorno.

En muchas comunidades, tal incorporación ha estado acompañada por un proceso de resignificación cultural, donde las abejas y la miel son valoradas no solo por su utilidad, sino también por su pureza, su conexión con la salud natural y su vínculo con el ciclo de la vida. En algunos contextos se habla incluso de una dimensión espiritual de la miel, asociada a su energía vital y a su armonía con la naturaleza.

Experiencias de capacitación y acompañamiento técnico han sido claves para fortalecer esta práctica. En ellas, se ha considerado la cosmovisión de las comunidades, sus calendarios ecológicos y conocimientos sobre el bosque, permitiendo integrar la apicultura de manera coherente con el territorio y sus dinámicas culturales. Por ejemplo, en algunas comunidades las decisiones respecto a la ubicación de las colmenas se toman en forma colectiva, utilizando principios como el *ñawün* (mirada compartida) (Chávez, 2016).

Iniciativas Locales y Sostenibilidad

Entre 2015 y 2021, en varias regiones del sur de Chile, especialmente en Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, se ejecutaron más de 60 proyectos apícolas con enfoque intercultural en comunidades mapuche, a través de distintas instituciones como INDAP, CONAF, CONADI y ONGs que han apoyado el desarrollo apícola con enfoque intercultural.

Entre los ejemplos más destacados se encuentran:

- Cooperativas mapuches de apicultores que producen miel con sello de origen territorial y/o cultural.
- Experiencias de certificación orgánica y comercio justo, con fuerte componente de identidad local.
- Incorporación de la apicultura en escuelas interculturales rurales, como herramienta educativa ligada a la biodiversidad.

Estas iniciativas han permitido implementar proyectos que promueven el uso de flora nativa melífera, la instalación de colmenas, la capacitación técnica y, en algunos casos, la certificación orgánica o de comercio justo. Por ejemplo, las comunidades pewenche del Alto Biobío han desarrollado experiencias productivas integradas que combinan la apicultura con el turismo, la conservación del bosque y la alimentación saludable, en coordinación con programas públicos (Cortés & Boza, 2017; ODEPA, 2022).

En este sentido, la miel representa mucho más que un producto comercial: es una forma de revalorar el entorno, de generar ingresos de forma sostenible y de fortalecer los vínculos entre las personas, el bosque y las especies nativas que lo habitan.

Prácticas Respetuosas y Conocimiento Tradicional

El desarrollo de la apicultura en estos territorios ha ido acompañado de un enfoque que respeta el conocimiento ecológico tradicional. La recolección y el manejo de plantas, por ejemplo, se realiza con conciencia de los ciclos naturales y de la energía de cada especie. Swekes *et al.* (2018) destacan que muchas comunidades entienden el bosque como un espacio que no debe ser intervenido sin intención ni respeto, lo que también se aplica al trabajo con las abejas melíferas (*Apis mellifera*) y a la ubicación de los apiarios cerca de especies medicinales o simbólicas.

Así, la apicultura no solo se adapta al entorno, sino que se entrelaza con los valores culturales locales. La miel que se produce bajo estos criterios no es únicamente un alimento: es un símbolo de conexión con el bosque, con el territorio y con formas de vida que buscan armonía y equilibrio.

Aunque la apicultura no tiene raíces ancestrales en los pueblos originarios de Chile, su desarrollo actual en estos territorios representa una oportunidad para integrar prácticas sostenibles, respetuosas del entorno y coherentes con los valores culturales locales. Al emplear flora nativa y al incorporar principios como el cuidado, la colectividad y la armonía con la naturaleza, la apicultura se transforma en una herramienta valiosa para el bienestar de las comunidades, el fortalecimiento de su identidad y el cuidado del bosque nativo.

Apicultura desde la Cosmovisión Mapuche

El testimonio del apicultor mapuche-pehuenche, Bernardino Melillán, de la zona de Melipeuco, ofrece una mirada íntima y profunda sobre la apicultura como parte de un modo de vida conectado con la naturaleza y la espiritualidad. Su relato permite comprender cómo la producción de miel puede convertirse en un acto cultural, respetuoso del entorno y cargado de significados identitarios.

“Vienen muchos estudiantes de Santiago a ver quiénes son los mapuches, piensan que estamos quemando camiones, quemando bosques, entonces yo les enseño, qué es la espiritualidad, la filosofía, qué es lo que es arte, y los estudiantes se van llenos de energías, porque yo los llevo al alihuen y les hago una rogativa afuera. Nosotros no somos católicos ni evangélicos, nosotros somos mapuches; todas las actividades las hacemos afuera con la naturaleza, con el wallmapu, entonces la conexión que tiene el mapuche es con el ngen, el ngenco, el gnen mahuida, etc., y por eso hacemos las actividades afuera, al aire libre, con los pajaritos, con los arbolitos, con el sol, con los vivos, son todos vivos.”

Este enfoque espiritual también se traduce en la manera en que se maneja la colmena, desde el respeto hacia las abejas hasta el uso de prácticas naturales sin químicos. Bernardino describe así su vínculo con las abejas:

“Las abejitas se trabajan de forma suave. Si uno habla con las abejitas, lo hace de forma suave; hay que hablarles, cantarles. Aquí normalmente yo trabajo sin la ropa, yo trabajo suave y las abejas no reaccionan”.

Su conocimiento apícola es profundo, resultado de la experiencia directa con la naturaleza:

“Las abejas salen a trabajar con 8 grados. La familia se compone de 60 mil a 80 mil abejas, 15 mil zánganos y una sola reina. La función del zángano es procrear: fecunda a la reina en un vuelo nupcial de 45 metros de altura, en forma circular. Sale la reina virgen y salen 150 zánganos detrás. Luego de llenarla [de semen], se mete a su cajón y no sale nunca más”.

Además, su enfoque de producción privilegia los métodos naturales:

“En apicultura no le pongo ni un químico. Yo trabajo con la hoja de canelo, laurel y ruda, y le hago un puro y mato a la varroa. Uno tiene que hacer sus cosas en forma más orgánica”.

La importancia de este enfoque no es solo técnica, sino simbólica y cultural. Al producir miel utilizando flora nativa como el ulmo, el canelo o el maqui, y hacerlo bajo prácticas coherentes con el conocimiento tradicional, se genera un producto con identidad biocultural. La miel deja de ser simplemente un alimento o un producto de mercado, y se convierte en alimento-medicina, vinculado al *nwen*, la energía espiritual que según la cosmovisión mapuche habita en las plantas y seres vivos.

Este relato muestra cómo la apicultura, cuando se vincula al territorio, la espiritualidad y la cultura, se convierte en una estrategia de soberanía alimentaria y de afirmación identitaria. Así, el saber tradicional no es solo un conocimiento del pasado, sino una herramienta viva para construir un presente más justo y sustentable, desde y para los territorios indígenas.

FLORA UTILIZADA EN LA APICULTURA

Chile posee una flora diversa y con altos niveles de endemismo, lo que ha permitido el desarrollo de una apicultura con características únicas. La interacción entre las abejas y la vegetación nativa da origen a mieles diferenciadas, cuyo valor radica tanto en su composición como en su identidad territorial. La flora melífera, compuesta por especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, ha demostrado ser fundamental en la producción de mieles monoflorales de alta calidad.

Especies Arbóreas y Arbustivas con Importancia Apícola

Montenegro *et al.* (2013) analizaron muestras de polen corbicular recolectado por abejas en distintos puntos del país, identificando numerosas especies vegetales de relevancia apícola. Estas muestras evidencian el uso intensivo de especies nativas por parte de las abejas para la recolección de polen y néctar.

Según Montenegro (2022), la producción de miel en Chile varía significativamente de acuerdo al origen botánico y geográfico de las plantas visitadas por las abejas. Por ejemplo, en el oasis de Pica, ubicado en una zona desértica del norte del país, se produce miel monofloral de chañar (*Geoffrea decorticans*), lo que demuestra el potencial apícola incluso en condiciones extremas.

En la zona central, caracterizada por un clima mediterráneo, predominan formaciones vegetales como el matorral y el bosque esclerófilo. Estas comunidades albergan especies como el quillay (*Quillaja saponaria*), tevo (*Retanilla trinervia*), corcolén (*Azara celsastrina*), litre (*Lithraea caustica*), arrayán (*Luma apiculata*), sauce (*Salix humboldtiana*) y peumo (*Cryptocarya alba*), todas ellas reconocidas por su aporte a la producción de mieles monoflorales de origen endémico (Montenegro, 2000).

Más al sur, en las regiones del bosque templado valdiviano y la zona patagónica, se producen mieles monoflorales nativas a partir de especies como el ulmo (*Eucryphia cordifolia*), tiaca (*Caldcluvia paniculata*), tineo (*Weinmannia trichosperma*), tepú (*Tepualia stipularis*), notro (*Embothrium coccineum*) y avellano (*Gevuina avellana*) (Montenegro *et al.*, 2008).

Dentro de estas especies mencionadas, destacan particularmente las mieles de ulmo, quillay y corcolén, no solo por su identidad territorial, sino también por sus propiedades biológicas. Estudios recientes atribuyen a estas mieles interesantes actividades antimicrobianas y antioxidantes, relacionadas principalmente con su contenido de compuestos fenólicos (Montenegro *et al.*, 2021; Velásquez *et al.*, 2020).

Otras mieles monoflorales, como las de tiaca, tineo y tevo, han empezado a ganar reconocimiento por sus propiedades sensoriales y beneficios para la salud. No obstante, algunas especies como el avellano y el guindo santo (*Eucryphia glutinosa*) aún requieren mayor investigación para comprender completamente su potencial.

Un estudio de Lobos *et al.* (2022), citado por Montenegro (2022), analizó 200 muestras de miel provenientes de las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. En él se identificaron 47 especies florales melíferas, de las cuales 23 correspondían a especies nativas como el quillay, corcolén, tineo, ulmo, tiaca y arrayán. De acuerdo con este estudio, un 56% de las mieles eran monoflorales, un 2% biflorales y un 42% multiflorales. Estas mieles cumplían con los estándares físico-químicos nacionales e internacionales, consolidando su calidad.

Los resultados del estudio permitieron identificar dos grandes áreas productoras:

- Una zona de clima mediterráneo (regiones IV a VII), donde predominan mieles monoflorales endémicas y poliflorales nativas con alta diversidad específica.
- Una zona de transición al clima templado húmedo (regiones VIII a X), donde se producen tanto mieles monoflorales nativas como multiflorales de diversidad restringida.

En Chile, la norma NCh2981.Of2005 regula la denominación de origen botánico de la miel. Según esta, una miel monofloral debe contener al menos un 45 % del polen de una sola especie vegetal.

En el **Cuadro 1** se presenta un listado de algunas especies arbóreas y arbustivas de importancia apícola, incluyendo su nombre común, indígena y científico.

Cuadro 1. Especies arbóreas con importancia apícola.

Nombre común	Nombre indígena	Nombre científico	Distribución	Fuente de:		
				Polen	Néctar	Propóleo
Arrayán	Kolümamüll	<i>Luma apiculata</i>	V–XI	X	X	X
Avellano	Ngefün	<i>Gevuina avellana</i>	V–XI	X	X	
Boldo	Folo	<i>Peumus boldus</i>	IV–X	X	X	
Canelo	Foye	<i>Drimys winteri</i>	IV–XII		X	
Chequén	Chiñchiñ	<i>Luma chequen</i>	IV–X	X	X	
Espino	—	<i>Acacia caven</i>	III–VIII	X		
Laurel	Triwe	<i>Laurelia sempervirens</i>	VI–X	X		
Lingue	Linge	<i>Persea lingue</i>	V–X			
Luma	Luma	<i>Amomyrtus luma</i>	VII–XI	X	X	
Madroño	Réfél	<i>Escallonia pulverulenta</i>	IV–IX	X	X	X
Maitén	—	<i>Maytenus boaria</i>	III–X	X	X	
Maqui	Külon	<i>Aristotelia chilensis</i>	IV–X	X	X	X
Meli	—	<i>Amomyrtus meli</i>	VIII–X	X	X	
Notro	—	<i>Embothrium coccineum</i>	VI–XII	X	X	
Peumo	—	<i>Cryptocarya alba</i>	V–X	X		
Quillay	Küllay	<i>Quillaja saponaria</i>	IV–VIII	X	X	X
Radal	Radal	<i>Lomatia hirsuta</i>	IV–X	X	X	
Roble	Koyam	<i>Nothofagus obliqua</i>	V–X			
Tepú	—	<i>Tepualia stipularis</i>	VII–XIII	X	X	
Tiaca	—	<i>Caldcluvia paniculata</i>	VII–XI		X	
Tineo	Teniw	<i>Weinmannia trichosperma</i>	VI–XI		X	
Ulmo	Ngulngu	<i>Eucryphia cordifolia</i>	VIII–X		X	

Especies Herbáceas con Importancia Apícola

Además de las especies arbóreas y arbustivas, las plantas herbáceas también juegan un rol importante en la apicultura chilena, especialmente en la zona central. Grimaud *et al.* (2014) analizaron 92 muestras de miel recolectadas en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, detectando una importante contribución de malezas y herbáceas europeas. Del total de especies melíferas, un 74 % fueron exóticas y el 53 % correspondían a especies de ciclo perenne.

Las familias botánicas más representadas en esta categoría fueron *Fabaceae*, *Asteraceae* y *Brassicaceae*, lo que evidencia la relevancia de estas plantas para la alimentación de las abejas durante distintos periodos del año.

En el **Cuadro 2** se presentan las especies herbáceas más relevantes detectadas en el estudio.

Cuadro 2. Especies herbáceas con importancia apícola (Grimau *et al.*, 2014).

Especie	Familia	Origen	Ciclo de vida
<i>Galega officinalis</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Medicago sativa</i>	<i>Fabaceae</i>	Euroasiática	Perenne
<i>Trifolium repens</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Medicago polymorpha</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Anual
<i>Melilotus indicus</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Anual
<i>Raphanus raphanistrum</i> ssp. <i>sativus</i>	<i>Brassicaceae</i>	Europa	Anual/Bianual
<i>Lotus pedunculatus</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Rubus ulmifolius</i>	<i>Rosaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Eschscholzia californica</i>	<i>Papaveraceae</i>	EE. UU.	Perenne
<i>Anthemis cotula</i>	<i>Asteraceae</i>	Europa	Anual
<i>Rumex acetosella</i>	<i>Polygonaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Acmispon subpinnatus</i>	<i>Fabaceae</i>	Chile	Anual
<i>Daucus carota</i>	<i>Apiaceae</i>	Europa	Anual/Bianual
<i>Echium vulgare</i>	<i>Boraginaceae</i>	Europa	Bianual
<i>Trifolium pratense</i>	<i>Fabaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Convolvulaceae</i>	Europa	Perenne
<i>Coriaria ruscifolia</i>	<i>Coriariaceae</i>	Sudamérica	Arbusto
<i>Helenium aromaticum</i>	<i>Asteraceae</i>	Chile	Perenne
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Betulaceae</i>	Europa	Árbol
<i>Brassica</i> sp.	<i>Brassicaceae</i>	Europa	—
<i>Sisymbrium</i> sp.	<i>Brassicaceae</i>	Europa	—
<i>Trifolium</i> sp.	<i>Fabaceae</i>	Europa	—
<i>Lotus</i> sp.	<i>Fabaceae</i>	Europa	—
<i>Medicago</i> sp.	<i>Fabaceae</i>	Europa	—

Especies Nativas Reconocidas en la Apicultura de los Pueblos Originarios

En el sur de Chile, muchas de las especies del bosque nativo que poseen valor melífero son también parte del patrimonio cultural de los pueblos originarios, fundamentales en la alimentación, medicina tradicional y prácticas espirituales mapuches (**Cuadro 3**). Especies como el maqui (*Aristotelia chilensis*), el canelo (*Drimys winteri*), el boldo (*Peumus boldus*), el ulmo (*Eucryphia cordifolia*) y el laurel (*Laurelia sempervirens*) no solo ofrecen propiedades curativas, sino que también forman parte del patrimonio agroalimentario indígena, siendo utilizadas en infusiones, preparaciones culinarias y rituales (Cortés & Boza, 2017).

En procesos de formación desarrollados con comunidades mapuches, lafkenches y pewenches, se ha identificado una estrecha relación entre especies forestales nativas y el conocimiento ecológico tradicional. A través de metodologías participativas, las comunidades han reconocido y validado especies como el ulmo, canelo, maqui, notro y tiaca, no solo por su valor apícola, sino también por su importancia medicinal, ceremonial y alimentaria (Durstón, 2001).

Cuadro 3. Especies valoradas por su uso tradicional y melífero.

Especie	Nombre mapuche	Uso medicinal	Valor melífero
<i>Drimys winteri</i>	Folle	Dolencias respiratorias y rituales	Alto
<i>Aristotelia chilensis</i>	Külon	Antiinflamatorio, digestivo	Medio-Alto
<i>Luma apiculata</i>	Kolümamüll	Cicatrizante, infecciones leves	Alto
<i>Laurelia sempervirens</i>	Triwe	Relajante, antiséptico	Medio
<i>Quillaja saponaria</i>	Küllay	Limpieza y problemas dermatológicos	Alto

CONCLUSIÓN Y REFLEXIÓN

La apicultura, en contextos indígenas, puede ser comprendida como una práctica que articula conocimientos, valores y tecnologías provenientes de diferentes orígenes culturales. Su adopción por parte de comunidades mapuches, pewenches y lafkenches en el sur de Chile evidencia un proceso de hibridación cultural, en el que lo tradicional y lo moderno no se oponen, sino que se entrelazan en formas complementarias de desarrollo. Como plantea [García Canclini \(1990\)](#), la hibridación no implica la pérdida de identidad, sino la capacidad de recombinar elementos diversos en función de las necesidades locales. En este sentido, la apicultura indígena no replica simplemente modelos técnicos externos, sino que los adapta y resignifica a partir del conocimiento ecológico tradicional, el respeto por el bosque nativo y una cosmovisión que entiende la naturaleza como un conjunto de relaciones vivas y espirituales.

A nivel nacional, el rubro apícola presenta condiciones favorables para su expansión, tanto en términos de biodiversidad como de estatus sanitario. Según el Boletín Apícola del [SAG \(2024\)](#), Chile cuenta con más de 11.500 apicultores/as registrados/as, sin embargo, se observa una baja participación relativa de regiones con alta riqueza florística, como Los Ríos, Los Lagos y Aysén. Esta paradoja evidencia una brecha entre el potencial ecológico del territorio y su aprovechamiento productivo, especialmente en zonas rurales donde predominan comunidades campesinas e indígenas. Además, el rubro muestra importantes desafíos en materia de género y formalización: el 95 % de los/as apicultores/as no cuenta con personalidad jurídica y existe una clara sobrerrepresentación del género masculino. Estos elementos refuerzan la necesidad de políticas públicas que fortalezcan la equidad, la asociatividad y la innovación en el sector, con especial énfasis en el desarrollo con identidad territorial.

Desde una perspectiva socioecosistémica, los bosques no pueden ser comprendidos únicamente como reservas biológicas o fuentes de recursos, sino como espacios configurados por procesos sociales, políticos, ecológicos y simbólicos. Autores como [Berrouet et al. \(2018\)](#), [Haines-Young & Potschin \(2010\)](#) y [Reyes et al. \(2020\)](#) insisten en que los bosques son construcciones históricas, moldeadas por relaciones de poder, manejo y conocimiento. En este marco, la apicultura, lejos de ser una actividad neutra, participa activamente en la configuración del territorio, promoviendo formas de gobernanza más inclusivas y sustentables. En territorios indígenas, esta actividad se inserta en una matriz cultural que valora el bosque como un espacio sagrado, donde habitan fuerzas espirituales (*ngen*, *trayenko*, *alhue*) y donde las decisiones productivas deben ser coherentes con los ciclos naturales y los principios de respeto y reciprocidad.

La práctica apícola indígena refleja esta visión. Como relató Bernardino Melillán, apicultor mapuche-pewenche de Melipeuco, las abejas deben ser tratadas con respeto, hablándoles y trabajando sin violencia. Esta sensibilidad hacia los seres vivos expresa una forma de relación con la naturaleza que trasciende la productividad y conecta con una ética ecológica y espiritual. Asimismo, Melillán destaca el uso de plantas nativas como el canelo, el laurel o la ruda en sus prácticas sanitarias, evitando el uso de químicos. Estos enfoques, si bien no siempre reconocidos formalmente, aportan modelos de producción más orgánicos, regenerativos y culturalmente significativos.

Especies nativas como *Bombus dahlbomii*, el abejorro gigante o moscardón, refuerzan la conexión entre polinización, biodiversidad y cosmovisión. Considerado una especie sagrada en el mundo mapuche (*pullomeñ*), este polinizador cumple un rol clave en la regeneración del bosque y en la mantención de especies vegetales melíferas. Su pérdida, hoy acentuada por especies invasoras y el cambio climático, no

es solo un problema ecológico, sino también cultural. Preservar su existencia implica proteger tanto el ecosistema como las memorias y prácticas que lo significan.

Finalmente, la apicultura, como actividad flexible y adaptable, ofrece una vía concreta para la soberanía alimentaria, la generación de ingresos, la diversificación productiva y la afirmación de identidades. Sin embargo, para que este potencial se concrete, se requieren programas de apoyo específicos, con enfoque intercultural, que valoren el conocimiento local y promuevan la formación técnica, el acceso a mercados diferenciados y la certificación de origen botánico y cultural. De igual modo, es fundamental promover la investigación aplicada, la documentación de buenas prácticas, y el fortalecimiento de redes entre apicultores/as indígenas y no indígenas, para avanzar hacia una gobernanza socioecosistémica que reconozca el papel de la apicultura en la conservación del bosque, la transmisión cultural y el desarrollo sustentable.

REFERENCIAS

- Berrouet, L. M., Machado, J., & Villegas-Palacio, C. (2018).** Vulnerability of socio-ecological systems: A conceptual framework. *Ecological Indicators*, 84, 632–647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.051>
- Cea Wilkomirsky, Kürew (2023).** Memoria biocultural en la comuna de Panguipulli: percepciones de sus habitantes sobre la transformación del paisaje (1972-2022). Proyecto de título para optar al título profesional de Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción. 78 p.
- Chamorro-García, F. J. (2013).** El polen apícola como producto forestal no maderable. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 1(2): 45–56. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a04>
- Chávez, M. F. (2016).** Desarrollo sustentable: ¿Un concepto pertinente para el desarrollo local en la apicultura? *Scripta Philosophiae Naturalis*, N° 9. Pp: 49–63.
- Cortés, M., & Boza, S. (2017).** Patrimonio agroalimentario en el sur de Chile: Un elemento para el desarrollo territorial (Serie Ciencias Agronómicas N° 29). Universidad de Chile.
- Cuevas, M., Ruiz, C., Pavez, P., Lobos, I., Acevedo, C., Currián, M., Silva, M., & Dolarea, J. L. (2021).** Apicultura en el Territorio Patagonia Verde, Región de Los Lagos (Boletín INIA N° 442). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32953>
- Durston, J. (2001).** Capacitación microempresarial de jóvenes rurales indígenas en Chile. En *Capacitación microempresarial de jóvenes rurales indígenas en Chile* (pp. 38–58). SENCE/INDAP.
- FAO. (1996).** Value-added products from beekeeping. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Agricultural Services Bulletin* N° 124. Roma. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6d850fcb-b308-4dcd-920e-0aa7667e1e6a/content>
- FAO. (1999).** State of the World's Forests. Capítulo 10: Productos forestales no madereros. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO, (2025).** Productos forestales no madereros (PFNM). <https://www.fao.org/forestry/nwfp/es>
- García Canclini, N. (1990).** Culturas híbridas: Estrategias para entrar y salir de la modernidad. Grijalbo.
- Grimau, L., Gómez, M., Figueroa, R., Pizarro, R., Núñez, G., & Montenegro, G. (2014).** The importance of weeds as melliferous flora in central Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 41(3), 387–394. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000300011>
- Gutiérrez, A. P. (2017).** Productos forestales no maderables: Clasificación y ejemplos. *Revista Forestal Latinoamericana*, 32(1), 45–58.
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010).** The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Ecology*, 110–139. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750458.007>

- Montalva, J., Dudley, L. S., Sepúlveda, J. E., & Smith-Ramírez, C. (2020). The giant bumble bee (*Bombus dahlbomii*) in Mapuche cosmovision. *Ethnoentomology: An Open Journal of Cultural Entomology*.
- Montenegro G., Gómez M., Díaz-Forestier J. y Pizarro, Rodrigo. (2008). Aplicación de la Norma Chilena Oficial de denominación de origen botánico de la miel para la caracterización de la producción apícola. *Ciencia e investigación agraria*, 35(2): 181-190. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202008000200007>
- Montenegro, G, Pizarro, R, Mejías, E, & Rodríguez, S. (2013). Evaluación biológica de polen apícola de plantas nativas de Chile. *Phyton* (Buenos Aires), 82(1), 7-14. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-56572013000100002&lng=es&tlng=es.
- Montenegro, G. (2000). "Guía de plantas de uso apícola". En: *Medicina folklórica, artesanal y ornamental*. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago.
- Montenegro, G. (2022). "Un país, un producto prioritario": la miel chilena. Informe Producto 1 Estudio FAO – UC. Acción global sobre el desarrollo verde de productos agro productos especiales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Montenegro, G. (2023). Mieles chilenas para el mundo: atributos, propiedades e innovación. Santiago, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc7995es>
- Montenegro, G., Velásquez, P., Viteri, R., Giordano, A. (2021). Changes in the antibacterial capacity of Ulmo honey samples in relation to the contribution of *Eucryphia cordifolia* pollen. *Journal of Food and Nutrition Research JFNR-2021-023.R1*.
- ODEPA (2022). Boletín de la miel en Chile: cifras y mercados. Ministerio de Agricultura.
- PEFC Chile (2020). Primera certificación de miel como PFNM sostenible. CERTFOR – Sistema Chileno de Certificación Forestal. <https://www.pefc.cl/noticias/por-primera-vez-en-chile-la-miel-obtiene-certificacion-de-origen-forestal-sostenible>
- Reyes, R., Razeto, J., Barreau, A., & Müller-Using, S. (2020). *Hacia una socioecología del bosque nativo en Chile*. 1ª ed. Santiago: Social-Ediciones; Instituto Forestal, 2020.
- Rozman, A.S., Hashim, N., Maringgal, B. & Abdan, K. (2022). A Comprehensive Review of Stingless Bee Products. *Applied Sciences*, 12(13), 6370. <https://doi.org/10.3390/app12136370>
- Servicio Agrícola y Ganadero. (2024). Boletín Apícola N.º 9. Ministerio de Agricultura. <https://www.sag.gob.cl/content/boletin-apicola-ndeg-9-mayo-2024>.
- Skewes, J. C., Trujillo, F., Riquelme, W., & Catalán, E. (2018). La apicultura y la conservación socialmente inclusiva del bosque esclerófilo y templado en Chile. *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad*, 5(14): 128-148.
- Terram (2015). Proyecto recupera bosque nativo a través de la producción de miel Fundación Terram. <https://www.terram.cl/proyecto-recupera-bosque-nativo-a-traves-de-la-produccion-de-miel/#:~:text=Gracias%20a%20la%20miel%20que,que%20no%20tienen%20mucho%20uso%E2%80%9D.&text=El%20Proceso%20de%20Montreal%20es,Silvestres%20Protegidas%20de%20la%20Conaf>.
- Velásquez, P., Montenegro, G., Leyton, F., Ascar, L., Ramirez, O. & Giordano, A. (2020). Bioactive compounds and antibacterial properties of monofloral ulmo honey. *CyTA-Journal of Food*, 18(1): 11–19. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1701559>



APUNTE

Sostenibilidad del abastecimiento de biomasa para pellet en Chile: estado actual, dependencias y proyecciones.

Juan Carlos Pinilla Suárez^{1*}; Joaquín García Inostroza¹; Karina Luengo Vergara¹; Felipe Navarrete Ulloa¹; Karoline Casanova del Río¹ & Mauricio Navarrete Torres¹.

¹ Instituto Forestal, sede Biobío. Concepción, Chile.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.662>

Recibido: 02.04.2026; Aceptado 19.05.2026.

RESUMEN

El sector de los biocombustibles sólidos derivados de la madera en Chile cumple un rol relevante en la diversificación de la matriz energética y en la reducción de la contaminación ambiental, por lo que el acceso a información actualizada resulta fundamental para la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas. En este contexto, la industria del pellet ha experimentado un rápido crecimiento, aunque condicionado por la disponibilidad de subproductos provenientes de la industria del aserrío, principalmente asociados a la producción de *Pinus radiata*. En el marco de un proyecto CORFO, el Instituto Forestal analizó antecedentes del Anuario Forestal y del Informe de Subproductos de la Industria del Aserrío, con el fin de evaluar la disponibilidad de materias primas como aserrín y viruta para la producción de pellet. Durante 2024 se generaron 4,65 millones de m³ de subproductos, cifra 6,12 % superior a la registrada en 2023, lo que representa una recuperación tras varios años de disminución. Entre las regiones del Maule y La Araucanía se concentró el 86,7 % de la producción nacional, destacando Biobío con un 34,8 %. El aserrín primario constituyó el principal subproducto generado. Sin embargo, la fuerte dependencia del pellet respecto del sector del aserrío representa una vulnerabilidad para el abastecimiento futuro, especialmente ante el aumento sostenido de la demanda y las exigencias de la Ley 21.499. Por ello, siendo la oferta de biomasa el límite del crecimiento de la industria del pellet en Chile, se plantea la necesidad de monitorear la producción del sector del aserrío, diversificar las fuentes de biomasa mediante nuevas especies forestales, biomasa agrícola y plantaciones de corta rotación.

Palabras clave: Biomasa, pellet, energía, aserrío, biocombustibles.

SUMMARY

The solid biofuels sector derived from wood in Chile plays a significant role in diversifying the energy matrix and reducing environmental pollution, making access to updated information essential for decision-making and the development of public policies. In this context, the pellet industry has experienced rapid growth, although constrained by the availability of by-products from the sawmilling industry, mainly associated with the production of *Pinus radiata*. Within the framework of a CORFO project, the Forest Institute analyzed data from the Forestry Yearbook and the Sawmill Industry By-products Report to assess the availability of raw materials such as sawdust and shavings for pellet production. In 2024, a total of 4.65 million m³ of by-products were generated, representing a 6.12% increase compared to 2023 and marking a recovery after several consecutive years of decline. Between the Maule and La Araucanía regions, 86.7% of the national production was concentrated, with the Biobío Region accounting for 34.8%. Primary sawdust was the main by-product generated. However, the strong dependence of pellet production on the sawmilling sector represents a vulnerability for future supply, particularly in light of the sustained increase in demand and the requirements established under Law 21,499. Therefore, given that the supply of biomass is the limiting factor for the growth of the pellet industry in Chile, there is a need to monitor the production of the sawmill sector, diversify biomass sources through new forest species, agricultural biomass, and short-rotation plantations.

Keywords: Biomass, Pellets, Energy, Sawmills, Biofuels

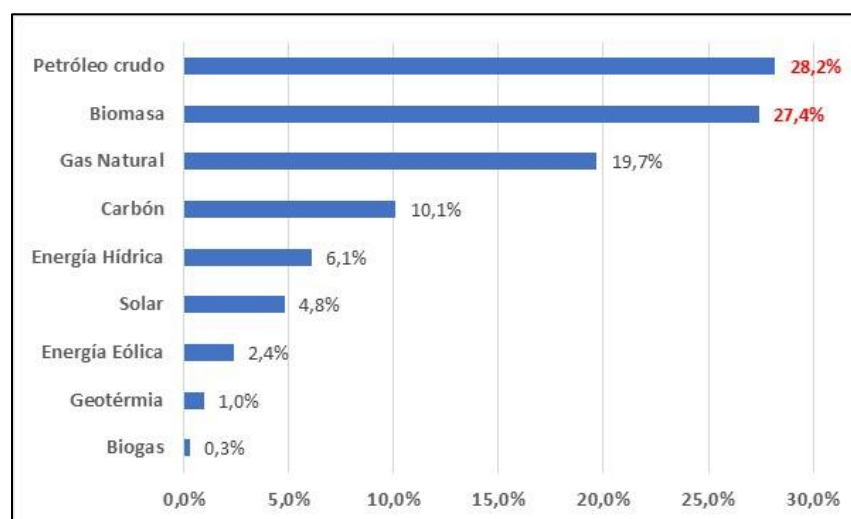


INTRODUCCIÓN

Se reconoce a la biomasa como una fuente de energía renovable, que permite reducir emisiones de CO₂ (mitigación); que es estable y que además es la única gestionable, pues puede ser planificada, manejada y generada. INFOR ha establecido que el uso de la biomasa forestal para la generación de energía debe ser reconocido y valorado por la sociedad chilena como una fuente de energía renovable, con múltiples beneficios sociales, económicos y ambientales. Complementariamente, el Ministerio de Agricultura en su Política Forestal (MINAGRI, 2015) expresa que se debe consolidar la contribución del sector forestal a la seguridad e independencia energética y descarbonización de la matriz de energía primaria, incrementando la producción y utilización de biomasa forestal. Estos enunciados se alinean también con la Política Energética 2050, definida por el Ministerio de Energía, donde destaca y fomenta el uso más intensivo de energías renovables.

Según el Ministerio de Energía, en Chile la participación de la biomasa en la matriz energética primaria alcanza cerca del 27 %, siendo superada solo por los combustibles derivados del petróleo (Figura 1). Los principales usos de la energía en base a biomasa se relacionan con generación eléctrica, calefacción, generación eléctrica, procesos de secado, agua sanitaria y preparación de alimentos, entre otros.

Existe un número importante de habitantes de Chile que participan del negocio de la bioenergía (leña, pellet, astillas térmicas, etc.), con empleos y servicios relacionados con la cosecha del árbol, su trozado, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización y transporte a destino, entre otros. Ello significa un impacto económico, especialmente en las economías locales, comunales, provinciales o regionales.



(Fuente: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>)

Figura 1. Matriz primaria de energía en Chile

El Instituto Forestal, como entidad referente en la generación de información estratégica del sector forestal, desarrolla una investigación relacionada con la diversificación de la matriz energética, la reducción de la pobreza energética y la mejora de los emprendimientos en el área de la dendroenergía. Es, además, una institución que apoya el trabajo de diversos ministerios para avanzar en el cumplimiento de compromisos y metas en torno al uso y fomento de la energía renovable.

Este documento se preparó en el marco del proyecto CORFO “Plataforma para la Sustentabilidad del Pellet Biobío”, desarrollado por INFOR y cuyo mandante es el Ministerio de Energía; y se enmarca en el programa permanente de la línea de investigación de INFOR sobre biomasa forestal y energía. Dicho programa se

orienta a la generación de información que responda a una demanda permanente de los actores relacionados con el uso de la biomasa forestal para la generación de energía renovable, para apoyar el desarrollo y diversificación de la matriz energética nacional, aportando a la construcción de políticas públicas y desarrollos silvícolas y tecnológicos requeridos por los diferentes sectores involucrados.

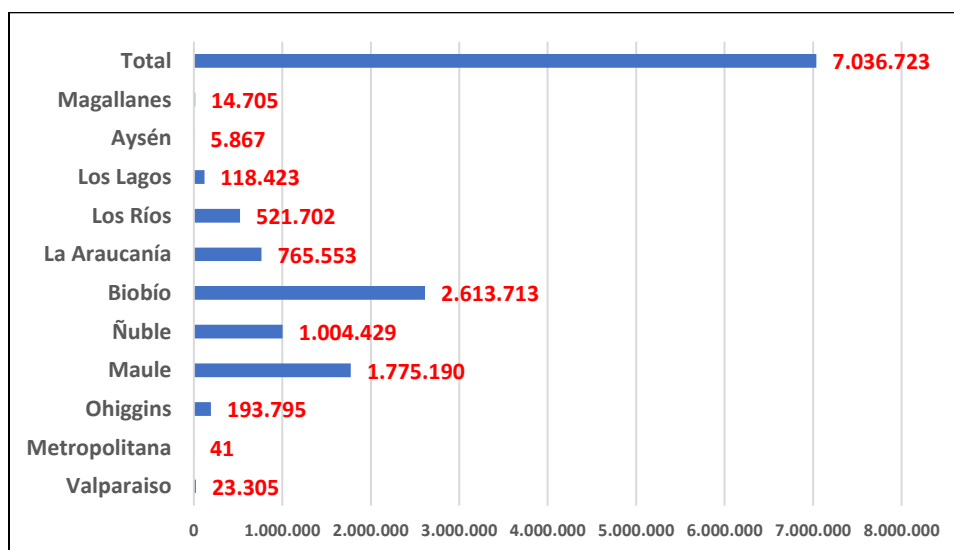
Entre tales aspectos, el abastecimiento de biomasa forestal para distintos procesos de generación de energía es una temática importante de abordar, especialmente en la industria del pellet de madera. Se necesita información sobre la “oferta de biomasa” para conocer los volúmenes disponibles, su origen, posibles destinos y sustentabilidad de la oferta. Esta búsqueda de información se centra en las regiones del Maule a la Araucanía, donde se concentra la mayor parte de la industria del aserrío y de la producción de pellet del país.

En el contexto indicado, el presente documento tiene por objetivo generar información relevante que permita determinar el estado actual de la biomasa forestal disponible y potencialmente utilizable para la producción de pellet, de manera de apoyar los procesos de toma de decisiones por parte de distintos sectores. Para tal efecto, se recopiló información relacionada con el uso de la biomasa forestal para su utilización en energía, desde documentos disponibles en la biblioteca institucional de INFOR; la búsqueda de antecedentes se orientó a la producción regional de subproductos de la industria primaria del aserrío. Las fuentes de información utilizadas corresponden principalmente a informes técnicos generados por el Área de Estudios Económicos de INFOR, más otra adicional generada por proyectos específicos en desarrollo.

SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DEL ASERRÍO

Los subproductos de la industria del aserrío son aquellos productos que quedan disponibles luego de la transformación primaria de trozas en madera aserrada, o de la transformación secundaria de la madera en productos elaborados o remanufacturados.

La cantidad de subproductos del aserrío está en estrecha relación con el nivel de actividad de la industria del aserrío, siendo necesario monitorear su comportamiento año a año, por cuanto cualquier variación en los niveles de producción de esta industria tiene un efecto inmediato en la cantidad de subproductos disponibles. La producción del año 2024 se presenta en la **Figura 2**.



(Fuente: Catelicán *et al.*, 2025)

Figura 2. Producción de madera aserrada durante el año 2024 según región (m³)

La región del Biobío se destacó por generar la mayor cantidad de producción de madera aserrada durante el año 2024, con un 37,1 % del total nacional, mientras que las regiones del Maule, Ñuble, Biobío y Araucanía en su conjunto presentan el 87,5 % del total producido.

Con el correr de los años, la industria del aserrío desarrolló una nueva opción productiva, relacionada con el uso y comercialización de los subproductos que anteriormente eran considerados un desecho (**Figura 3**). La envergadura o importancia de esta oportunidad de negocio ha provocado que tales desechos hoy en día se consideren como subproductos de la industria del aserrío, lo cuales se destinan a:

- Autoconsumo
- Comercialización
- Acopio
- Regalo o donación

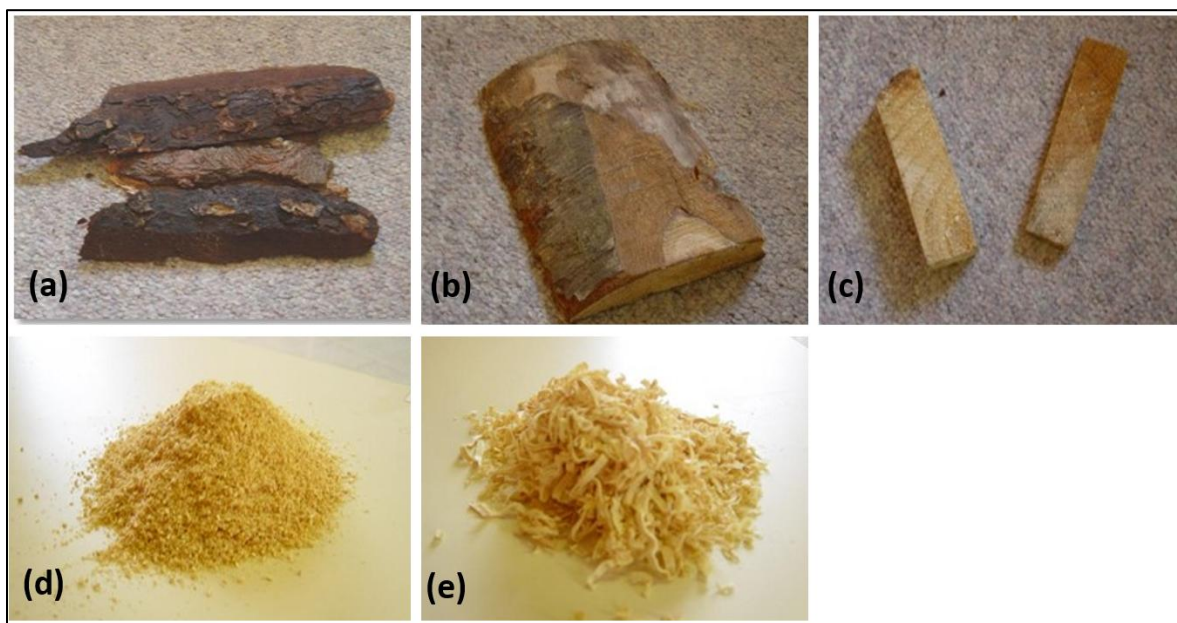
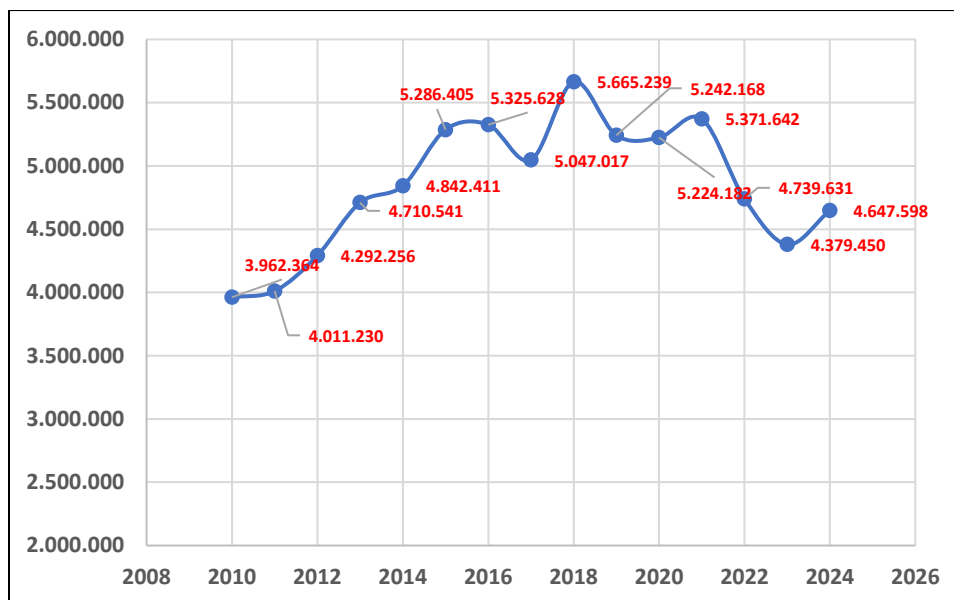


Figura 3. Subproductos de la industria del aserrío: (a) corteza; (b) lampazo; (c) despuntes; (d) aserrín; (e) virutas.

Es importante destacar que el mayor desarrollo de la industria del aserrío, así como también la principal demanda por los subproductos, se concentra entre las regiones del Maule y la Araucanía. La cantidad de subproductos generados por la industria del aserrío durante los años 2010 a 2024, se presenta en la **Figura 4**.

Al analizar la generación de subproductos en los últimos años, se advierte una disminución derivada de la menor tasa de producción de madera aserrada, la que empieza a revertirse durante el año 2024. La producción de subproductos cayó un 7,6 % en 2023 y solo repuntó en 2024, lo que indica una tendencia incierta.

La cantidad de subproductos del aserrío, generados regionalmente durante el año 2024, se presenta en el **Cuadro 1**. En él se observa que, la generación de subproducto ocurre en 11 regiones del país, y que las mayores cantidades se concentran entre las regiones del Maule a La Araucanía, con el 86,7 % de la generación de subproductos.



(Fuente: Catelacán *et al.*, 2025)

Figura 4. Generación de subproductos del aserrío en periodo 2010-2024 (m³)

Cuadro 1. Desglose regional de la generación de subproductos del aserrío durante el año 2024 (m³).

Región	Volumen de subproductos (m³)	Proporción del total (%)
Valparaíso	24.739	0,53
Metropolitana	67	0,00
O'Higgins	152.574	3,28
Maule	1.196.560	25,75
Ñuble	620.281	13,35
Biobío	1.618.023	34,81
Araucanía	590.545	12,71
Los Ríos	316.586	6,81
Los Lagos	100.551	2,16
Aysén	5.863	0,13
Magallanes	21.809	0,47
Total	4.647.598	

(Fuente: Catelacán *et al.*, 2025)

En 2024, la macrozona comprendida por las regiones del Maule a La Araucanía generó 4.025.409 m³ de subproductos del aserrío, lo que representa el 86,7 % del volumen de producción nacional, destacándose la región del Biobío con un 34,8 % de la producción nacional, que a su vez representa el 40,2 % del volumen producido en la macrozona analizada (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Generación de subproductos del aserrío en la macrozona Maule-Araucanía durante el año 2024 (m³).

Región	Volumen (m ³)	Proporción del total país (%)	Proporción de la macrozona analizada (%)
Maule	1.196.560	25,75	29,70
Ñuble	620.281	13,35	15,40
Biobío	1.618.023	34,81	40,20
Araucanía	590.545	12,71	14,70
Total Macrozona	4.025.409	86,69	
Total País	4.647.598		

(Fuente: Catelicán *et al.*, 2025).

La cantidad de subproductos del aserrío generado durante el año 2024, según región, tipo y destino, se presenta en el **Cuadro 3**. La cantidad de subproductos de la industria del aserrío generados durante el año 2024 en la macrozona con mayor actividad del aserrío, (Maule a La Araucanía) según destino y tipo, se presenta en los **Cuadros 4 y 5**.

El aserrín primario corresponde a aserrín verde con un alto porcentaje de humedad, el cual a nivel país se genera en cerca del 37,5 % en la región del Biobío; en la macrozona este valor representa el 88 %. Un mínimo porcentaje de aserrín secundario, el cual presenta un bajo contenido de humedad, es posible conseguirlo de la industria de la remanufactura de la macrozona, el que representa solo un 3,5 %.

Los subproductos generados en la macrozona Maule-Araucanía tienen como principales destinos la comercialización (49,9 %) y el autoconsumo (34,8 %), representando el 84,7 % del total de esta biomasa producida a nivel nacional, y el 97,8 % del total producido en la macrozona. Estas cifras son similares a las reportadas durante el año 2023, aun cuando en el año 2024 aumentó levemente el volumen de subproductos del aserrío a nivel nacional.

Los subproductos del aserrío son fuertemente demandados por las plantas de cogeneración, plantas de astillado, plantas de tableros, industria del secado, calefacción, celulosa, e incluso, planteles de crianza, entre otros, a lo que se agregan las propias plantas productoras de pellet que requieren de biomasa para aumentar su producción. También es importante destacar que el 34,8 % de los subproductos generados a nivel país son destinados al autoconsumo, cifra que en años anteriores alcanzaba el 29,9 %. Lo anterior se debe a que la industria del aserrío utiliza estos subproductos para la generación de energía y otros procesos productivos en sus plantas.

Del total de subproductos generados en la macrozona Maule-Araucanía, el 54,6 % corresponde a aserrín primario, seguido de corteza con un 23,7 %.

Cuadro 3. Subproductos de la industria del aserrío, año 2024, según macrozona, tipo y destino final (m³)

Región	Subproducto	Comercializa	Autoconsumo	Regala	Acumula	Total
Maule	Corteza	200.436	58.573	3.542	2.441	264.992
	Lampazo	142.532	34.038	580	4.118	181.269
	Aserrín primario	346.333	201.212	3.531	2.526	553.602
	Aserrín secundario	32.186	30.851	174	0	63.211
	Viruta	32.306	45.693	0	30	78.029
	Despuntos	3.666	48.987	2.806	0	55.458
	Total	757.459	419.353	10.633	9.115	1.196.560
Ñuble	Corteza	98.016	57.370	127	946	156.458
	Lampazo	7.247	205	725	3.051	11.228
	Aserrín primario	169.208	196.414	371	3.006	368.999
	Aserrín secundario	5.608	12.446	5	285	18.345
	Viruta	7.351	27.933	0	8	35.291
	Despuntos	4.774	25.154	26	5	29.959
	Total	292.204	319.522	1.255	7.300	620.281
Biobío	Corteza	253.468	151.961	418	1.524	407.371
	Lampazo	52.966	1.330	1.689	4.081	60.066
	Aserrín primario	488.716	433.688	1.675	13.754	937.833
	Aserrín secundario	33.825	9.885	36	550	44.296
	Viruta	58.499	23.170	41	328	82.038
	Despuntos	39.270	46.769	376	3	86.418
	Total	926.743	666.803	4.235	20.241	1.618.023
Araucanía	Corteza	91.773	32.239	1.125	1.288	126.425
	Lampazo	52.104	4.042	4.090	5.093	65.328
	Aserrín primario	185.487	134.051	8.988	10.584	339.110
	Aserrín secundario	9.745	4.433	699	442	15.320
	Viruta	2.205	21.188	1.143	115	24.651
	Despuntos	447	17.516	1.748	0	19.711
	Total	341.761	213.469	17.794	17.521	590.545
Total Macrozona	Corteza	643.693	300.143	5.212	6.199	955.246
	Lampazo	254.849	39.615	7.084	16.343	317.891
	Aserrín primario	1.189.744	965.365	14.565	29.870	2.199.544
	Aserrín secundario	81.364	57.615	914	1.277	141.172
	Viruta	100.361	117.984	1.184	481	220.009
	Despuntos	48.157	138.426	4.956	8	191.546
	Total	2.318.168	1.619.148	33.915	54.178	4.025.409
Total País	Corteza	766.389	307.135	6.480	8.797	1.088.801
	Lampazo	347.573	53.319	12.094	20.306	433.291
	Aserrín primario	1.433.495	1.003.976	25.586	36.762	2.499.821
	Aserrín secundario	99.961	61.734	1.533	1.314	164.542
	Viruta	113.785	148.615	1.899	481	264.780
	Despuntos	51.756	138.787	5.812	8	196.362
	Total	2.812.959	1.713.566	53.404	67.668	4.647.598

(Fuente: Catelicán *et al.*, 2025)**Cuadro 4.** Destino de los subproductos de la industria del aserrío en el año 2024, en macrozona Maule-Araucanía (m³).

Destino	Volumen (m ³)	Proporción del total país (%)	Proporción de la macrozona analizada (%)
Comercializa	2.318.168	49,88	57,59
Autoconsumo	1.619.148	34,84	40,22
Regala	33.915	0,73	0,84
Acumula	54.178	1,17	1,35
Total macrozona	4.025.408	86,61	100,00

Cuadro 5. Tipo de los subproductos de la industria del aserrío en el año 2024, en macrozona Maule-Araucanía (m³).

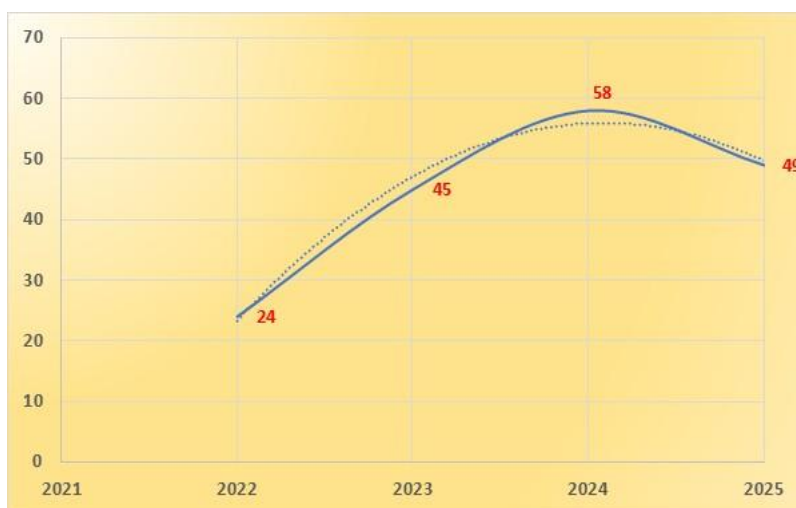
Tipo	Maule	Ñuble	Biobío	Araucanía	Total
Corteza	264.992	156.458	407.371	126.425	955.246 (23,73 %)
Lampazo	181.269	11.228	60.066	65.328	317.89 (7,90 %)
Aserrín primario	553.601	369.000	937.834	339.110	2.199.545 (54,64 %)
Aserrín secundario	63.211	18.345	44.296	15.320	141.172 (3,51 %)
Viruta	78.029	35.291	82.038	24.651	220.009 (5,47 %)
Despunte	55.458	29.959	86.418	19.711	191.546 (4,76 %)
Total	1.196.560 (29,73 %)	620.281 (15,41 %)	1.618.023 (40,20 %)	590.545 (14,67 %)	4.025.408 (100,00 %)

(Fuente: Catelicán *et al.*, 2025)

INDUSTRIA DEL PELLET

En Chile, la industria del pellet ha presentado un acelerado crecimiento en los últimos años, situación que obedece a una serie de factores, entre los que se destacan, cambios culturales de los usuarios finales por utilizar opciones energéticas más limpias; programas ministeriales regionales para el recambio de equipos de calefacción; apoyo a procesos de descontaminación debido a problemas ambientales atribuibles al mal uso de la leña; y búsqueda de alternativas energéticas de mayor comodidad y eficiencia, entre otros.

En el año 2022 existían 24 plantas productoras de pellet en el país, con un volumen total de producción cercano a las 180.000 toneladas. A fines del año 2025 existían aproximadamente 49 plantas productoras de pellet de diferentes capacidades de producción (**Figura 5, Cuadro 6**), las que en su conjunto se estima generaron cerca de 240.000 toneladas el año 2024. Se debe señalar que durante el año 2025 se llegó a identificar hasta cerca de 60 plantas productoras en el país, demostrando una gran variabilidad en la entrada y salida del mercado de estas unidades productivas.

(Fuente: Pinilla *et al.*, 2025)**Figura 5.** Evolución del número de empresas productoras de pellet en Chile.

Cuadro 6. Número de plantas de pellet según región (diciembre 2025).

Región	N° de plantas	Proporción del total (%)
Valparaíso	2	4,08
Metropolitana	6	12,24
O'Higgins	1	2,04
Maule	10	20,41
Ñuble	1	2,04
Biobío	14	28,57
La Araucanía	9	18,37
Los Ríos	4	8,16
Los Lagos	1	2,04
Magallanes	1	2,04
Valparaíso	2	4,08
Total	49	100,00

(Fuente: Pinilla *et al.*, 2025b)

En los últimos años se ha observado un incremento relevante en el número de plantas productoras de pellet en el país, lo que ha sido una característica de este sector, con un permanente ingreso de plantas productoras y también, la retirada de algunas de ellas. Se debe señalar que este aumento se enmarca en un escenario donde la disponibilidad de materia prima desde el sector del aserrío se ha mantenido constante, o con leves variaciones en su cantidad, durante los últimos años.

Las principales razones del retiro de plantas se refieren al abastecimiento permanente de biomasa de calidad adecuada para la producción de pellet, el costo de la biomasa, el costo de la energía y la competencia creciente en el sector. Esto último reflejado en un valor del saco de pellet que se ha mantenido constante durante el año 2025 e incluso con tendencia a la baja.

Del **Cuadro 6** se puede destacar que, el 28,6 % de las plantas productoras de pellet del país se ubican en la región del Biobío, seguido por las regiones del Maule y la Araucanía, concentrando el 67,4 % del total de plantas productoras de pellet en el país durante el año 2025.

En la región del Biobío, la concentración de las plantas de pellet se relaciona directamente con la actividad del aserrío, siendo Los Ángeles y Coronel las comunas con mayor presencia de este tipo de industria (**Cuadro 7**).

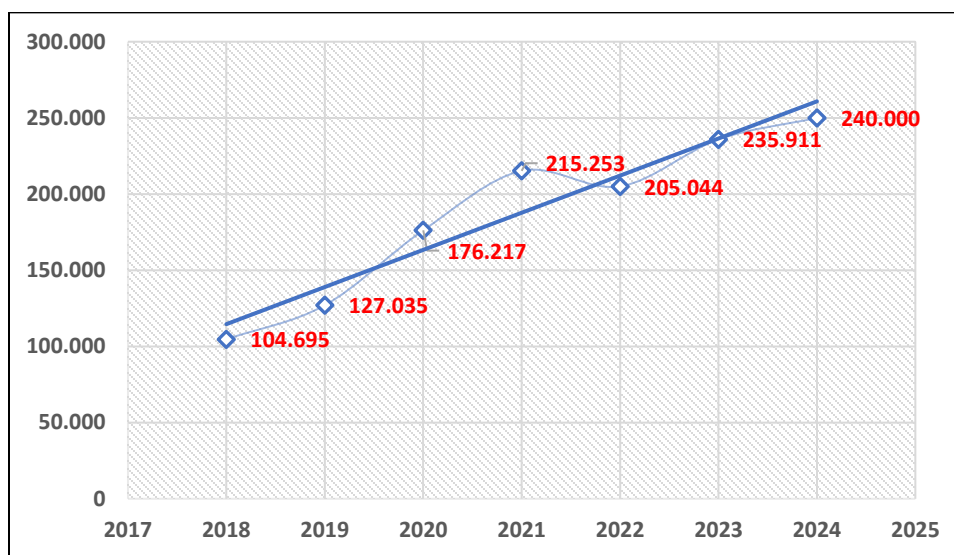
Cuadro 7. Distribución de plantas de pellet según comuna en la región del Biobío.

Comuna	N° de plantas
Los Ángeles	6
Coronel	6
Los Álamos	1
Talcahuano	1
Total	14

(Fuente: Pinilla *et al.*, 2025b).

La existencia de cerca de 50 plantas productoras en un escenario de oferta de biomasa constante puede resultar en fenómenos de sobre competencia, presión sobre precios o la fragilidad financiera de plantas pequeñas sin abastecimiento asegurado.

A partir de información recopilada por INFOR, es posible describir los rangos de producción de la industria del pellet en los últimos años. Esta información inicial se basa en antecedentes de producción aportados directamente por los productores de pellet (**Figura 6**).



(Fuente: Pinilla *et al.*, 2025b)

Figura 6. Producción de pellet en el período 2018-2024 (toneladas).

Se destaca que, la producción de pellet ha presentado un crecimiento permanente durante los últimos años y que, respecto del año 2018, la producción se ha incrementado aproximadamente en un 129 %.

Relación Subproductos del Aserrío y la Producción de Pellet

El total país de subproductos generados por la industria del aserrío y remanufactura a nivel nacional durante el año 2024, alcanzó a cerca de 4,65 millones de m³ (**Cuadro 3**). Esta cifra representa un aumento en comparación con el año 2023, marcando un quiebre en la tendencia de retroceso tras los altos niveles de actividad alcanzados en 2021.

La industria del pellet actualmente utiliza como materia prima principalmente aserrín primario, aserrín secundario y viruta. El detalle de los volúmenes generados para estos subproductos durante el año 2024, según tipo de destino, se desglosa en las casillas correspondientes del **Cuadro 3**. De ese cuadro se desprende que en la macrozona Maule-Araucanía existen 1.371.469 m³ de subproductos con destino a comercialización (53,6 % del total de subproductos de la macrozona), que pueden ser utilizados en la producción de pellet (aserrín primario, aserrín secundario y viruta), así como también para otras industrias que actualmente los demandan, siendo necesario conocer estos porcentajes de consumo.

Al total anterior se le pueden agregar los 1.140.964 m³ (44,6 % del total de subproductos de la macrozona Maule-Araucanía), correspondientes a la biomasa que es consumida por los mismos aserraderos en la generación de energía para sus propios procesos productivos. Este nivel de consumo confirma una demanda importante por subproductos del aserrío capturada por parte de los aserraderos, lo que disminuye la disponibilidad para abastecer a la industria del pellet. Por lo mismo, se hace necesario profundizar el análisis del autoconsumo de la industria del aserrío, y evaluar la disponibilidad de un volumen potencial de subproductos que pudiese redirigirse a la industria del pellet.

Algunas empresas productoras de pellet están asociadas a un aserradero, por lo que cuentan con un porcentaje de abastecimiento basal asegurado. El aumento de las tasas de producción de pellet en los

últimos años ha provocado que las plantas que contaban con abastecimiento propio hayan tenido que complementar su demanda por materia prima a través de compra a terceros.

Como se mencionó, la generación de subproductos del aserrío se relaciona directamente con la producción de madera aserrada, por lo que resulta de interés conocer cómo ha evolucionado la producción de esta industria y el número de aserraderos que la componen (**Cuadro 8**).

Cuadro 8. Producción de madera aserrada, generación de subproductos del aserrío y número de aserraderos en operación durante el período 2010-2024.

Año	Madera aserrada (m ³)	Subproductos (m ³)	Aserraderos (N°)
2010	6.353.900	3.962.364	1.073
2011	6.784.700	4.011.230	1.018
2012	7.160.200	4.292.256	973
2013	7.720.700	4.710.541	940
2014	7.998.800	4.842.411	912
2015	8.372.200	5.286.405	1.090
2016	8.455.100	5.325.628	1.101
2017	8.150.900	5.047.017	1.056
2018	8.307.200	5.665.239	984
2019	8.030.400	5.242.168	957
2020	7.873.800	5.224.182	938
2021	8.683.500	5.371.642	922
2022	7.858.600	4.739.631	851
2023	6.955.300	4.333.450	801
2024	7.036.700	4.647.598	763

(Fuente: Poblete *et al.*, 2025 y Catellicán *et al.*, 2025).

Es importante destacar que, en los últimos años, el número anual de aserraderos en operación exhibe una tendencia a la baja; no obstante, durante el año 2024 se registró una leve alza en la actividad de los aserraderos, en un escenario que se ha caracterizado por la disminución en la tasa de producción de madera aserrada y subproductos madereros.

El **Cuadro 8** ratifica la estrecha dependencia que existe entre el desarrollo productivo de la industria del aserrío y la generación de subproductos madereros. Esta relación sugiere que variaciones en la producción de la industria del aserrío, afectan directamente la generación y disponibilidad de los subproductos usados como materia prima para la producción de pellet.

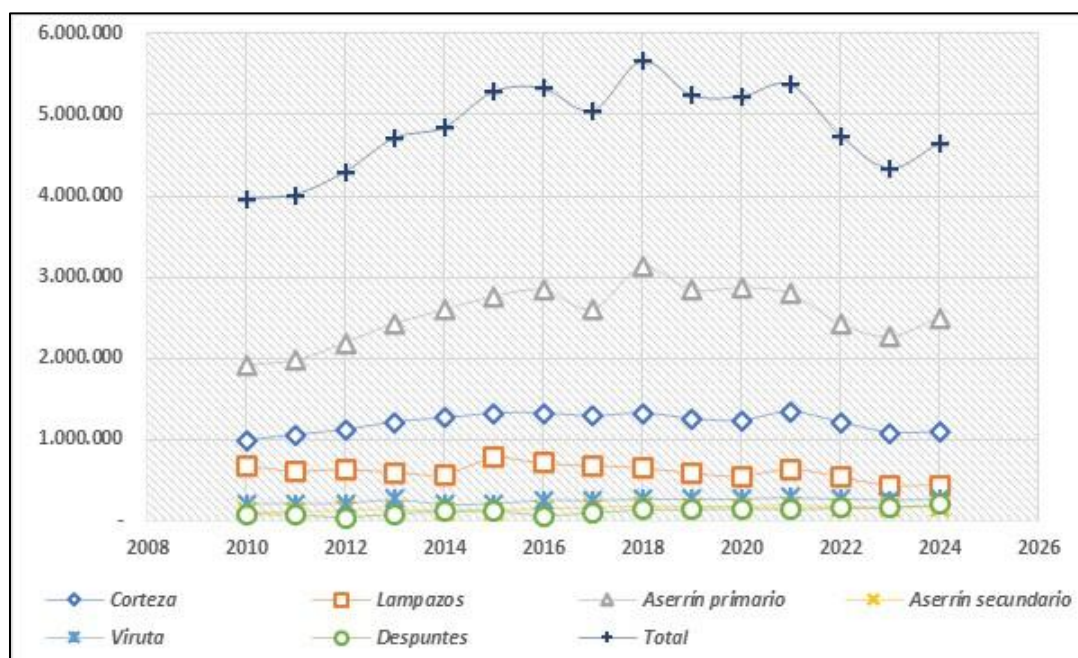
La evolución del volumen de los distintos tipos de subproductos del aserrío generados en el período 2010-2024 se presenta en la **Figura 7**.

El volumen total de subproductos generados el año 2024 alcanzó los 4.647.598 m³, valor superior en un 7,3 % al volumen producido el año anterior (4.333.162 m³). Esta variación requiere ser monitoreada, por cuanto la tasa de producción de pellet se ha incrementado estos últimos años y se espera que continúe aumentando los años siguientes, lo que se traduce en un aumento de la demanda por subproductos del aserrío, que en la actualidad representa prácticamente la única fuente de abastecimiento para la industria del pellet.

Entre los subproductos del aserrío potencialmente usables por la industria del pellet, el mayor volumen corresponde al aserrín primario, mientras que el aserrín secundario y la viruta presentan volúmenes menores (**Figura 7**).

Para estimar la disponibilidad de materia prima para abastecer a la industria del pellet, se consideran los volúmenes que se comercializan de aserrín primario, aserrín secundario y viruta, los que han tenido variaciones en sus tasas de producción en los últimos 6 años analizados, alcanzando el año 2024 a

1.647.241 m³, que representa el 58,6 % de los subproductos destinados a comercialización durante dicho año a nivel nacional. Un porcentaje de ellos está siendo destinado a la producción de pellet, así como también para otras industrias que actualmente los demandan (**Cuadro 9**).



(Fuente: Catelacán *et al.*, 2025).

Figura 7. Evolución de los subproductos de la industria del aserrío según año y tipo (m³).

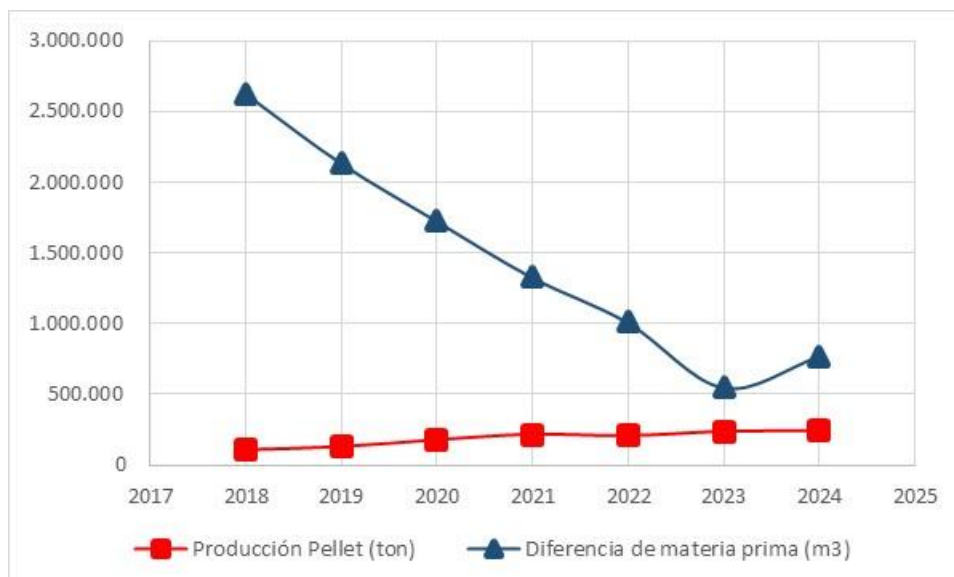
Cuadro 9. Relación entre generación de subproductos del aserrío (m³) y producción de pellets (ton).

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Subproductos (m ³)	3.569.001	3.278.381	3.311.401	3.264.508	2.854.042	2.671.440	2.929.143
Pellet (ton)	104.695	127.035	176.217	215.253	205.044	235.911	240.000

(Fuente: Pinilla *et al.* (2025a; 2025b)).

Considerando un requerimiento de 9 m³ de subproductos¹ para producir una tonelada de pellet, y asumiendo como materia prima potencial los volúmenes totales de los tres subproductos que son utilizados por la industria del pellet (aserrín primario, aserrín secundario y viruta), en la **Figura 8** se muestra la producción anual de pellet y la diferencia entre el volumen de subproductos potencialmente disponibles para pellets y el volumen requerido por esa industria.

¹ Información proporcionada por empresas del pellet



(Fuente: Pinilla *et al.* (2025a; 2025b)).

Figura 8. Producción de pellet (ton) y diferencia entre el volumen (m³) de subproductos del aserrío potencialmente disponibles y el volumen requerido por la industria del pellet.

En la **Figura 8** se destaca la constante reducción del diferencial de materia prima en relación con el aumento en la producción de pellets, marcándose un quiebre el año 2024, cuando se observa una reversión en esta tendencia.

La producción de pellet ha tenido un crecimiento permanente, al igual que su demanda por abastecimiento de biomasa. El año 2024, esta demanda consumió cerca de 2.160.000 m³, lo que representó el 73,7 % de los volúmenes de aserrín primario, aserrín secundario y viruta potencialmente disponible para la industria del pellet; y estimándose un saldo disponible cercano a los 769.143 m³ para las otras industrias demandantes de este tipo de biomasa, o para nuevas plantas de pellet.

En este escenario se debe mencionar que, las empresas productoras de pellet mantienen anualmente existencias de este producto, de modo que el total real de biomasa requerido cada año puede presentar variaciones. Las cifras que se señalan son, entonces, máximos estimados de requerimientos de biomasa para la producción de pellet.

La demanda de materia prima por parte de la industria del pellet ha aumentado y se espera que continúe en alza; por lo tanto, es necesario asegurar el abastecimiento que permita responder a esta demanda creciente. El abastecimiento debe ser tanto en cantidad como en calidad, en un escenario donde la Ley 21.499 de Biocombustibles Sólidos del Ministerio de Energía, exigirá una adecuada calidad de este producto, tanto en su producción como en su comercialización.

Se debe mencionar que un porcentaje de los subproductos del aserrío es capturado por el autoconsumo de la propia industria del aserrío, y no está disponible para ser transferido a la industria del pellet.

La macrozona Maule-Araucanía concentra cerca del 67 % de las empresas productoras de pellet, requiriendo del abastecimiento de biomasa regional más interregional. El abastecimiento desde otras regiones hace necesario definir radios de abastecimiento, para que no se incremente el costo de la biomasa y, consecuentemente, el costo de producción del pellet, ni se afecte tampoco la disponibilidad logística real entre regiones para soportar el flujo y transporte interregional de biomasa, que pueda aumentar costos y disminuir competitividad.

Es importante determinar el porcentaje de los subproductos comercializables que está siendo absorbido por otras industrias (cogeneración, tableros, agroindustria, otros) y, frente a ello, analizar cómo podría evolucionar el precio de la biomasa ante un aumento de su demanda, o de posibles escenarios futuros que modifiquen la oferta y disponibilidad de la misma, incluyendo escenarios de escasez o déficit futuro de materia prima y de cuándo podrían ocurrir.

Se requiere entonces monitorear y cuantificar el potencial riesgo derivado de que el pellet dependa casi exclusivamente del aserrín y viruta del pino radiata, y con ello, qué otras alternativas de biomasa son técnicamente viables y económicamente competitivas. Adicionalmente, se debe determinar cuál es el potencial de crecimiento del mercado de pellet para consumo residencial y comercial; cuál es el impacto de variaciones en el costo de los insumos requeridos; cómo impacta la estabilidad del precio del pellet en la expansión de la industria.

Todo lo anterior en un escenario donde la demanda por pellet subió un 129 % desde 2018, pero la oferta de biomasa no ha crecido proporcionalmente, incluso se ha reducido; donde la superficie plantada con pino radiata sigue disminuyendo, al igual que la seguridad de abastecimiento futuro; agregándose, además, la ausencia de un plan nacional para plantaciones energéticas.

OTRAS OPCIONES DE ABASTECIMIENTO DE BIOMASA PARA PELLETS

El actual escenario de abastecimiento de biomasa para la industria del pellet, basado totalmente en los subproductos del aserrío de pino radiata, sugiere analizar posibles cambios en el modelo productivo, que permitan disminuir la dependencia con la industria del aserrío. Se debe analizar la factibilidad técnica y económica del uso de otras especies forestales, mezclas de estas; o cambios tecnológicos del modelo de abastecimiento que impliquen extraer la materia prima desde el bosque. Esta última, implicaría incorporar faenas de trozado, descortezado, triturado y secado de la biomasa, para que esta quede disponible para la producción de pellet, así como también establecer plantaciones forestales con fines energéticos, que permitan satisfacer la demanda futura por biomasa de la industria productora de pellet.

Uso de Otras Especies Forestales o Biomasa.

Considerando que en la actualidad la industria del pellet utiliza mayoritariamente biomasa de pino radiata y que en el país no se establecen plantaciones para la generación de biomasa para energía, se debe considerar la utilización de nuevas especies forestales. A su vez, también se debe iniciar el establecimiento de nuevas plantaciones con fines energéticos, que permitan generar en rotaciones cortas la biomasa que la industria del pellet requiere. Estas opciones tecnológicas involucran estudios de costos, que determinen la factibilidad técnica y económica para ser consideradas como posibles opciones de abastecimiento futuro.

Se requiere contar con información técnica acerca de la factibilidad de producir pellet de calidad con otros tipos de biomasa, provenientes de especies forestales distintas al pino radiata, que presenten una adecuada adaptación y crecimiento en el país y para las cuales se disponga de superficie que permita un abastecimiento permanente y seguro de biomasa. Esto incluye utilizar mezclas de biomasa de pino radiata con otras especies forestales que crecen en el país, incluyendo a eucaliptos o acacias, incluso, biomasa proveniente de la actividad agrícola. INFOR y otros autores han avanzado en estas temáticas, señalando la factibilidad de utilizar tales mezclas, teniendo precaución respecto al porcentaje de participación de pino radiata, especialmente para reducir el contenido de algunos parámetros químicos, como el contenido de cloro (Baettig, 2018; Pegoretti, 2021; Pinilla *et al.*, 2021; Pinilla *et al.*, 2023; Pinilla *et al.*, 2025a).

Junto con lo anterior, es necesario señalar la necesidad de evaluar las características físicas y químicas del pellet producido a partir de estas nuevas fuentes de biomasa, examinando la calidad del pellet producido según lo establecido por las normas chilenas vigentes.

Otra fuente de biomasa son las cáscaras de diversos frutos que se producen en el país, como la avellana europea, nueces y otras. Existe una experiencia en Chile sobre producción de pellet a partir de cáscara de avellana europea, con interesantes resultados; existen también experiencias en Europa con la utilización de estos tipos de biomasa, por lo que resulta aconsejable estudiar su factibilidad en Chile. Para usar este

tipo de biomasa, se deberán analizar las propiedades físicas y químicas del pellet producido, de modo que pueda ser comercializado en el país tras constatar que cumple con la normativa de calidad exigible para este tipo de biocombustible.

Cambio en el Modelo Tecnológico

El actual proceso de producción de pellet se inicia con la disponibilidad de aserrín o viruta en el patio de acopio de las plantas productoras. Esta biomasa proviene ya sea desde aserraderos asociados a las plantas de pellet, o bien, es adquirida en el mercado desde aserraderos externos. En otros países, las empresas de pellet inician su proceso directamente en el bosque, desde donde se extraen y procesan trozas para producir el pellet. En Coyhaique existe una experiencia de este tipo.

Cambiar el modelo tecnológico requiere incorporar equipos de secado de la biomasa, que permitan utilizar el material que proviene directamente del bosque, o que la madera pase por un período de secado al aire, previo en las canchas de almacenamiento. La biomasa que proviene directamente del bosque presenta altos contenidos de humedad. El secador es un factor relevante al momento de la planificación de la producción; sin embargo, las empresas peleteras no suelen disponer de este equipo y dependen de la materia prima que genera la industria de remanufactura, o bien deben recurrir a procesos de secado externos.

Se necesita identificar y estimar los costos de incorporar modelos forestales energéticos o plantas con secado propio, o el retorno esperado de la inversión si se utilizan otras fuentes de biomasa (plantaciones energéticas, uso de otras especies). En definitiva, hay que evaluar la viabilidad del modelo “desde el bosque” en el contexto chileno; y analizarlo según las estructuras de costos de cada empresa, el valor de la biomasa desde aserraderos y el valor del pellet en el mercado.

DISCUSIÓN FINAL

En el contexto energético nacional, la biomasa representa cerca del 27 % de la matriz energética primaria, y se destaca por su condición de recurso renovable. Los subproductos del aserrío, especialmente de pino radiata, son la principal fuente de suministro de biomasa para la industria del pellet.

Una preocupación estratégica del sector del pellet en Chile se relaciona con la sostenibilidad del suministro y la incertidumbre en la disponibilidad futura de aserrín y viruta. La generación de estos subproductos del aserrío ha disminuido entre 2020 y 2023, dando lugar a posibles escenarios de competencia por el uso de la biomasa y presiones al alza en los costos, lo que puede limitar la capacidad de expansión de la industria del pellet.

El impacto de la implementación de la Ley 21.499 en aspectos de producción y comercialización del pellet, representa una oportunidad para el sector, pero también, procesos para asegurar la calidad del biocombustible, su certificación y trazabilidad, así como en los costos involucrados en los aspectos normativos, especialmente para plantas pequeñas y medianas. A ello se agregan desafíos logísticos interregionales y el crecimiento acelerado de plantas productoras, lo que puede afectar la cadena de suministro.

Como opciones de nuevas alternativas de abastecimiento y desarrollo, se plantea la diversificación de la biomasa, incorporando nuevas especies forestales y biomasa agrícola, o el fomento de plantaciones energéticas de corta rotación para generar biomasa estable y sostenible, independiente del aserrío. Esta opción, requiere de I+D, adoptar procesos industriales como trozado, astillado y secado para mejorar la eficiencia y suministro de biomasa y el análisis de la calidad del biocombustible según normativa chilena.

Para fortalecer a la industria del pellet respecto al abastecimiento de biomasa para su producción, se sugiere contar con un sistema permanente de suministro de biomasa, con indicadores para anticipar déficits y diseñar políticas preventivas de abastecimiento; también llevar a cabo estudios completos para optimizar transporte interregional y diseñar flujos logísticos eficientes. Para tal efecto, es fundamental fomentar la

colaboración entre los sectores forestal, energético y agroindustrial para lograr cadenas de suministro robustas.

CONCLUSIONES

La industria del aserrío genera una cantidad importante de subproductos (4.647.598 m³ en el año 2024), los que representan la principal fuente de abastecimiento de materia prima para la industria del pellet. Los subproductos del aserrío también se destinan al autoconsumo de los propios aserraderos, centros de generación, plantas de pellet, agroindustria, industria del tablero, e incluso, planteles de crianza.

El uso de estos subproductos en energía favorece los procesos que buscan diversificar la matriz energética, su descarbonización y fomentar la utilización de energías renovables, siendo una oportunidad para aprovechar el potencial forestal del país.

Los subproductos del aserrío entre las regiones del Maule a La Araucanía concentran el 86,6 % del total nacional, lo que equivale a 4.025.409 m³. Ellos tienen como destino principal la comercialización (57,6 %), mientras que el 40,2 % de esta biomasa la autoconsumen los mismos aserraderos.

En la macrozona Maule-Araucanía, la producción creciente de pellet estaría requiriendo abastecimiento de biomasa interregional, para satisfacer la demanda de materia prima.

La fabricación y consumo de pellet es una opción que valora los subproductos de la actividad forestal, aportando a la generación de riqueza a nivel local y a la diversificación de la matriz energética del país.

La biomasa proveniente de los subproductos del aserrío es la materia prima clave para la industria del pellet. La producción de pellet se ha incrementado en los últimos años y se espera que continúe esta tendencia en los años siguientes, aumentando también su demanda por biomasa; la incertidumbre respecto a si la industria del aserrío podrá abastecer de la materia prima que se requerirá en el futuro; y creando la necesidad de monitorear las variaciones en la actividad y producción del sector aserrío. El incremento en la producción de pellet tiene un límite en la cantidad de subproductos de calidad posibles de utilizar por esta industria.

Es esencial fomentar nuevas fuentes de materia prima para la industria del pellet, incorporando otras especies forestales o bien mezclas de biomasa, para así reducir la dependencia de los subproductos del aserrío y mejorar la sustentabilidad futura del mercado del pellet. También se deben evaluar cambios de modelos productivos, analizando la factibilidad técnica y económica de extraer biomasa para pellets desde trozas del bosque, y de establecer plantaciones forestales con fines energéticos para satisfacer la demanda por biomasa de la industria productora de pellets.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación de Fomento y de la Producción, CORFO, por el apoyo a la ejecución del programa “Plataforma de gestión para resguardar la sustentabilidad del pellet en la región del Biobío”, en cuyo marco se generó esta publicación.

REFERENCIAS

- Baettig, R. (2018). Innovación en biocombustibles sólidos densificados de origen agrícola para consumidores domiciliarios urbanos e industriales. Informe final de proyecto. Descripción de biocombustibles sólidos densificados elaborados en el proyecto FIC Región del Maule. 2018. Universidad de Talca. <http://ficbiomasas.utalca.cl/>
- Catelicán, L., Bañados, J.C. & Pardo, E. (2025). Subproductos madereros de la industria del aserrío 2025. Instituto Forestal, Chile. Boletín Estadístico N° 208. 95p

- MINAGRI (Ministerio de Agricultura). (2015).** Política Forestal 2015–2035. 76p. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/77f05938-3c99-498d-a1d7-d584c85e0890>
- Pegoretti, H. (2021).** Evaluación de las propiedades de diferentes especies con potencial energético para elaboración de pellet de calidad. Congreso Online Internacional Florestal, CONIFLOR. Mayo 2021.
- Pinilla, J.C., Luengo, K., Navarrete, M. & Navarrete, F. (2021).** Estudio del pellet en base a especies forestales que crecen en la Región del Biobío. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32064>
- Pinilla, J.C., Navarrete, F., Luengo, K., Navarrete, M., García, J. & Casanova, K. (2023).** Caracterización del pellet elaborado en base a mezcla de biomasa de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la región del Biobío. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 265. 34 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32706>
- Pinilla, J.C., Navarrete, F., García, J., Navarrete, M., Casanova, K. & Luengo, K. (2025a).** Caracterización del pellet elaborado en base a la mezcla de biomasa de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* en la región del Biobío. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/33144>
- Pinilla, J.C., Navarrete, F., Luengo, K., Navarrete, M., García, J. & Casanova, K. (2025b).** Reporte pellet 2025. Documento de trabajo, proyecto Plataforma de gestión para resguardar la sustentabilidad del pellet en la región del Biobío. CORFO Bienes Públicos Estratégicos para la Competitividad 2023. Línea I+D Biomasa Forestal y Energía INFOR. 9 p.
- Poblete, P., Bañados, J., Gysling, J., Kahler, C., Pardo, E., Baeza, D., Catellicán, L. et al. (2025).** Anuario forestal 2025. INFOR. Disponible en <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/33115>



APUNTE

Caracterización de la oferta de viviendas prefabricadas en madera: brechas y desafíos para la política pública en la Región del Maule.

Susana Benedetti Ruíz^{1*} ; Pamela Poblete Hernández¹ ; Cecilia Gallardo Lara².

¹ Instituto Forestal, sede Metropolitana. Santiago, Chile. susana.benedetti@infor.cl; pamela.poblete@infor.cl

² Investigadora independiente.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.664>

Recibido: 05.05.2026; Aceptado 19.05.2024.

RESUMEN

En el actual escenario de déficit habitacional, urgencia climática y desafíos de pobreza energética, este estudio caracteriza la oferta de viviendas prefabricadas de madera en la Región del Maule, donde se concentra una actividad importante de la pyme maderera. Mediante levantamiento de información pública disponible respecto a empresas con presencia regional, se evalúan sus atributos técnicos, modalidades de venta y niveles de cumplimiento normativo declarados; con énfasis en aspectos clave como aislamiento térmico, uso de madera estructural y trazabilidad del producto. Los resultados revelan una oferta diversa en tamaño y modelos, con importantes brechas respecto de la calidad técnica y formalización. Solo una minoría de empresas declara estándares técnicos verificables; ninguna acredita cumplimiento pleno de normas estructurales y térmicas vigentes. La aplicación de una escala tipo Likert permitió sistematizar esta heterogeneidad, identificando una correlación positiva entre la complejidad de la oferta y el cumplimiento normativo declarado. Se concluye que, pese a contar con condiciones productivas favorables y una demanda insatisfecha de viviendas, la industria regional opera en un contexto de escasa regulación y baja articulación técnica. Se identifican oportunidades para avanzar hacia una oferta habitacional más normada, eficiente y adaptada al territorio, mediante estrategias que integren la regulación progresiva, el encadenamiento productivo, la formación técnica y el empoderamiento del consumidor. El fortalecimiento de este mercado puede contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida, reducir la pobreza energética y posicionar a la madera como un eje del desarrollo regional sustentable.

Palabras clave: déficit habitacional, viviendas de madera, empresas productoras de casas prefabricadas.

SUMMARY

In the current context of housing shortages, climate emergency, and the challenges of energy poverty, this study characterizes the supply of prefabricated wooden houses in the Maule Region, a region with a significant concentration of activity in the timber SME sector. Through a survey and the use of publicly available information from companies with a regional presence, technical attributes, sales methods, and declared levels of regulatory compliance are evaluated, with an emphasis on key aspects such as thermal insulation, use of structural timber, and product traceability. The results reveal a diverse supply in terms of size and models, with significant gaps in technical quality and formalization. Only a minority of companies declare verifiable technical standards, and none are accredited for full compliance with current structural and thermal regulations. The application of a Likert-type scale allowed for the systematization of this heterogeneity, identifying a positive correlation between the complexity of the supply and declared regulatory compliance. It is concluded that, despite favorable production conditions and an unmet demand for sustainable housing, the regional industry operates in a context of limited regulation and weak technical coordination. Opportunities have been identified to move towards a more regulated, efficient, and territorially adapted housing supply through strategies that integrate progressive regulation, production linkages, technical training, and consumer empowerment. Strengthening this market can significantly contribute to improving quality of life, reducing energy poverty, and positioning wood as a cornerstone of sustainable regional development.

Keywords: housing deficit, wooden houses, prefab home manufacturers.



INTRODUCCIÓN

En el contexto del creciente déficit habitacional en Chile y la necesidad urgente de promover soluciones constructivas sostenibles, la madera surge como una alternativa de alto potencial, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. Su disponibilidad como recurso renovable, su capacidad de capturar y almacenar carbono, sus propiedades térmicas y estructurales y la posibilidad de prefabricación industrializada la posicionan como un material estratégico para enfrentar simultáneamente los desafíos de acceso a la vivienda, eficiencia energética y mitigación del cambio climático. Diversos estudios y programas impulsados por el sector público y privado han demostrado que la construcción en madera permite reducir los plazos de edificación, mejorar el confort térmico de las viviendas, disminuir la huella ambiental de la construcción y avanzar hacia una matriz habitacional más resiliente y sustentable (Red de Pobreza Energética, 2019; World Bank, 2021; Madera21, 2023).

El déficit habitacional nacional estimado es de alrededor de 641.000 viviendas, cifra que va en aumento debido al crecimiento demográfico, procesos migratorios y falta de oferta accesible en el mercado formal (Déficit Cero & Centro UC de Políticas Públicas, 2022). Esta problemática ha incentivado el desarrollo y promoción de soluciones constructivas innovadoras como viviendas industrializadas, enfocadas en reducir tiempos de ejecución, elevar calidad, eficiencia energética y accesibilidad técnica.

En la región del Maule, que concentra una parte importante del patrimonio forestal y la industria maderera del país, existen condiciones favorables para impulsar el uso de la madera en soluciones habitacionales. Maule cuenta con capacidades productivas instaladas, proveedores locales, y necesidades habitacionales importantes, particularmente en zonas rurales y periurbanas (CIM UC – CORMA, 2023). Sin embargo, la participación de la madera en el mercado formal de la vivienda sigue siendo marginal y, en muchos casos, se desarrolla al margen de los estándares normativos y de calidad establecidos. Cifras de viviendas nuevas autorizadas reportan que el 12 % del total regional, utilizó madera en muros como material predominante en 2023 (INFOR, 2025).

El objetivo del estudio es caracterizar la oferta de viviendas prefabricadas de madera en Maule, identificando atributos técnicos, niveles de cumplimiento normativo y modalidades de entrega, para aportar información útil al diseño de políticas públicas y decisiones de compra informadas. Se enmarca en un creciente interés por soluciones habitacionales sostenibles y enfatiza tres aspectos críticos: (i) disponibilidad de información sobre oferta; (ii) parámetros de desempeño energético y confort; y (iii) existencia de normativa técnica para el uso de madera en la construcción habitacional. La revisión bibliográfica y el análisis territorial permiten identificar brechas y limitaciones de la oferta vigente, y visibilizar oportunidades para avanzar hacia un modelo de vivienda en madera formalizado, sostenible y adaptado a las necesidades locales.

ANTECEDENTES

La construcción en madera se consolida como alternativa sostenible y eficiente para enfrentar desafíos como el déficit habitacional, la crisis climática y la pobreza energética. A nivel internacional, la vivienda prefabricada se establece como una solución constructiva eficiente, acelerada y de menor impacto ambiental frente al déficit habitacional global. Según Cognitive Market Research (2024), el mercado mundial de viviendas prefabricadas alcanzó los US\$ 145.142,6 millones en 2024, con proyecciones de crecimiento sostenido hacia 2031. Para América del Sur, la misma fuente estima una participación aproximada del 5 % del total global, equivalente a US\$ 7.257 millones, con un crecimiento anual estimado del 6,4 % (Cognitive Market Research, 2025), observándose avances relevantes en países como Uruguay, Brasil y Colombia, los que han implementado políticas públicas, regulaciones específicas e incentivos financieros para fomentar la adopción de tecnologías prefabricadas, incluyendo soluciones en madera. Estas iniciativas son parte de estrategias nacionales para reducir el déficit de viviendas y promover construcciones más sustentables (Cognitive Market Research, 2025).

En Canadá y Finlandia, la madera es parte integral del sistema constructivo habitual. En Finlandia, aproximadamente el 80 % de las viviendas se construyen en madera (Finland.fi, 2019), impulsadas por

políticas estatales que promueven la descarbonización y el diseño eficiente, enmarcado en una normativa exigente en materia térmica, estructural y de resistencia al fuego (Ministry of the Environment of Finland, 2020). En Japón, país de sismos frecuentes, la industria de la construcción con madera ha desarrollado tecnologías avanzadas y ampliamente difundidas, donde cada mes se construyen aproximadamente 45.000 viviendas tradicionales de madera, equivalente al 82 % del total de construcciones de vivienda residencial baja (Amino, 2004); esto evidencia una adopción masiva de sistemas de entramado ligero y prefabricado. Estudios recientes sobre madera estructural en Japón muestran que la mayoría de los edificios de baja altura utilizan madera en sus estructuras, mientras que el gobierno impulsa el uso de sistemas *cross-laminated timber* (CLT) para construcciones de media y alta densidad (Takahashi, 2023).

En América Latina, Uruguay destaca por incorporar la madera en su Plan Nacional de Vivienda, generando normativas específicas para sistemas prefabricados certificados y programas de subsidio que facilitan su adopción a gran escala a través de la Hoja de Ruta para la Construcción de Vivienda Social en Madera (MVOT, 2022), que propone aumentar gradualmente la participación de madera en viviendas sociales hasta alcanzar un 20 % en 2032. Se han desarrollado proyectos piloto en Rivera y Artigas, reduciendo tiempos y costos constructivos significativamente (Fermi, 2022).

Estas experiencias internacionales demuestran que el éxito de la construcción en madera no depende exclusivamente de la disponibilidad del recurso forestal, sino también de la articulación efectiva entre regulación técnica, apoyo institucional, desarrollo de capacidades y acceso a financiamiento.

El análisis de experiencias internacionales permite identificar elementos clave para el desarrollo exitoso de la construcción en madera en Chile. Sin embargo, en Chile, a pesar de la abundancia de recursos forestales, su participación en edificaciones nuevas sigue siendo baja; en 2023 representó un 17 % del total de 9,8 millones de m² (INFOR, 2025). Diversas investigaciones nacionales han evidenciado ventajas relevantes de este material, como su buen desempeño térmico, menor huella de carbono, rapidez constructiva gracias a la prefabricación y alta adaptabilidad en el diseño. No obstante, estos beneficios solo se materializan cuando se aplican criterios técnicos rigurosos y se cumple con la normativa vigente en diseño estructural, eficiencia energética, protección frente a humedad e incendios, y durabilidad. Garay & Benedetti (2024) advierten que la falta de transparencia y el incumplimiento normativo de algunos fabricantes de viviendas prefabricadas en madera debilitan las garantías de calidad, seguridad y sustentabilidad de la oferta habitacional.

El estudio de Garay & Benedetti (2024) evaluó 88 empresas de viviendas prefabricadas en madera en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. A partir de criterios de cumplimiento normativo, complejidad técnica y atributos de sustentabilidad, se identificó una alta heterogeneidad en la oferta. Si bien un 83 % de las empresas están legalmente constituidas como constructoras o fabricantes, más de la mitad de los proyectos correspondían a soluciones de baja complejidad técnica, y solo un 11 % alcanzaba una calificación alta. Los atributos de sustentabilidad fueron escasamente reportados, destacando una baja comunicación sobre eficiencia energética, huella de carbono, uso de materiales reciclables o certificaciones voluntarias. Estos hallazgos evidencian la necesidad de fortalecer los requisitos técnicos y mejorar la trazabilidad de la calidad en el mercado habitacional en madera.

La oferta de viviendas de madera en la región del Maule ha sido abordada parcialmente en estudios previos que analizan el ecosistema regional de la construcción en este material. En particular, el informe del Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC-CORMA, 2023), entrega antecedentes sobre las capacidades productivas regionales, la presencia de actores clave y las modalidades constructivas utilizadas. Si bien este estudio no realiza un catastro detallado de empresas proveedoras de viviendas prefabricadas ni un análisis técnico de su oferta, sí identifica barreras normativas, institucionales y de capital humano que afectan el desarrollo del sector. Estos antecedentes permiten contextualizar el presente estudio, orientado a caracterizar la oferta habitacional del mercado regional, evaluando sus atributos técnicos, niveles de formalidad y cumplimiento normativo.

El confort térmico en las viviendas es un factor determinante para la salud, la calidad de vida y el gasto energético de los hogares. Según la Red de Pobreza Energética (2019), una gran parte del parque habitacional en Chile, especialmente en la zona centro-sur, fue construido sin considerar normativa térmica,

lo que se traduce en deficiencias importantes en aislación y eficiencia energética; incrementa la demanda de calefacción, comúnmente suplida con leña húmeda; agrava la contaminación intra y extradomiciliaria y la exposición a enfermedades respiratorias. En regiones como Maule, donde el clima impone la necesidad de calefacción, el problema se intensifica. La falta de estándares y de mecanismos eficaces de fiscalización ha dejado el confort térmico en manos de decisiones individuales, muchas veces sin el respaldo técnico necesario. Esta realidad refuerza la urgencia de avanzar en políticas públicas que aseguren condiciones mínimas de eficiencia energética en la vivienda, especialmente en la construcción en madera.

METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolla bajo un enfoque exploratorio y descriptivo. La metodología combina fuentes secundarias, revisión documental y levantamiento de información a través de una revisión exhaustiva de sitios web de las empresas. También se aplicó una evaluación cualitativa, tipo escala Likert, para sistematizar y comparar el cumplimiento de algunos criterios técnicos y constructivos relevantes.

Levantamiento de Información

Se elaboró un directorio de empresas que ofrecen viviendas prefabricadas en madera en la región del Maule, a partir de búsquedas en línea, redes de proveedores y plataformas comerciales especializadas. Posteriormente, se recopiló antecedentes técnicos y comerciales de su oferta, mediante revisión de catálogos y sitios web. La información recopilada considera variables como: superficie y dimensiones de las viviendas ofrecidas, nivel de prefabricación, modalidad de entrega (kit, armada o llave en mano), precio referencial, materiales empleados y grado de cumplimiento declarado con normativas técnicas vigentes (estructurales, térmicas, de seguridad). El estudio se acotó a empresas con oferta activa y presencia física en la región. Se reconoce como limitación la posible subrepresentación de proveedores informales o emergentes que no cuentan con presencia digital o canales formales de venta.

A partir de la información disponible, se aplicaron criterios de análisis técnico referenciados en normas nacionales aplicables a viviendas en madera (NCh433, NCh1079, NCh1198, Resolución Exenta N° 59 del MINVU), además de criterios complementarios sobre eficiencia energética, confort térmico y durabilidad. Se analizó además la visibilidad y trazabilidad de estos atributos en la oferta comercial.

Evaluación Cualitativa Mediante Escala Tipo Likert

Para caracterizar los atributos técnicos y normativos de la oferta habitacional en madera en Maule, se aplicó una escala de evaluación cualitativa tipo Likert, siguiendo la metodología propuesta por Garay & Benedetti (2024). Esto permitió sistematizar y comparar el grado de cumplimiento de ciertos criterios técnicos y constructivos con la información declarada por las empresas en sus canales de comunicación (sitios web, catálogos digitales y redes sociales).

La escala utilizada contempla cinco niveles de evaluación (**Cuadro 1**): el valor 1 representa la ausencia total de información o incumplimiento del criterio; el valor 5 indica un cumplimiento explícito, respaldado por evidencia técnica.

Las variables seleccionadas fueron:

- Declaración del cumplimiento de la norma estructural NCh433
- Declaración del cumplimiento de la norma térmica NCh1079
- Declaración de uso de norma NCh1198
- Declaración de uso de madera rotulada
- Información sobre materiales aislantes y su espesor
- Presencia o declaración de sellado de la vivienda
- Uso de madera impregnada o certificada
- Claridad de la información técnica y trazabilidad del producto
- Diseños y modelos de viviendas

- Tamaños de viviendas

El objetivo de este instrumento fue ofrecer una aproximación comparativa entre empresas, detectar buenas prácticas, así como brechas de información y calidad en la oferta regional. Este análisis se complementó con observaciones cualitativas y revisión directa del material promocional disponible públicamente.

Cuadro 1. Escala y descripción

Puntaje	Descripción
1	No se declara ni se observa el atributo
2	Se menciona de forma ambigua, sin detalle técnico
3	Se declara explícitamente, pero sin evidencia complementaria
4	Se declara con claridad y con respaldo parcial (catálogo, listado técnico, fotografías)
5	Se respalda con evidencia técnica verificable (planos, certificaciones, normativa aplicada)

RESULTADOS

Caracterización del Mercado de Viviendas de Madera

Si bien se encontraron 25 empresas que ofrecen viviendas prefabricadas en madera en la región del Maule, el estudio consideró 21 debido a que cuatro de ellas no presentaban publicaciones sobre sus productos.

La mayoría de las empresas se concentran en torno a la ruta Panamericana, en comunas como Talca, Linares y Curicó, siendo estas zonas los principales núcleos productivos de la región (**Figura 1**). Varias empresas declaran operar desde Linares y Talca; varias, además, ofrecen despacho o armado a otras regiones del país. En general, se trata de micro y pequeñas empresas, algunas con presencia digital más robusta que otras, pero en su mayoría con una estrategia comercial orientada a la venta directa al consumidor final, ya sea en modalidad kit o llave en mano.

Tipologías de Viviendas Ofrecidas

Las empresas ofrecen diversos modelos, en promedio 12 por empresa. Los tamaños varían entre 20 y 200 m², aunque la mayoría de los modelos se ubican entre 36 m² y 120 m². Las viviendas más pequeñas suelen ser espacios comunes, cabañas básicas o viviendas de emergencia, mientras que las de mayor superficie son propuestas de vivienda definitiva, con más de tres dormitorios. Las tipologías responden a diseños tradicionales, con predominio de plantas rectangulares o cuadradas y techumbres de dos a seis aguas, adecuadas para zonas con lluvias. Algunas empresas, como Casas Curicó, disponen de catálogos digitales donde presentan su oferta de modelos, facilitando la comparación y selección por parte de los compradores (**Figura 2**).

El análisis del tamaño de las viviendas prefabricadas, expresado como la superficie mínima y máxima de las unidades ofrecidas, revela importantes patrones en la oferta regional (**Figura 3**). La mediana del tamaño mínimo se sitúa en torno a los 36 m², lo que indica una orientación mayoritaria hacia soluciones habitacionales compactas, posiblemente dirigidas a primera vivienda económica, segundas viviendas o módulos básicos. La mayoría de los tamaños mínimos se concentra entre los 30 y 40 m², con algunos valores atípicos por debajo de los 25 m², que podrían corresponder a cabañas o construcciones de uso temporal y espacios compartidos. Por otro lado, el tamaño máximo presenta una mediana cercana a los 120 m², evidenciando una mayor diversidad en la oferta de modelos de gran escala. Se detectan varios casos por sobre los 150 m², lo que sugiere que algunas empresas apuntan a segmentos con mayores requerimientos espaciales, o con poder adquisitivo más alto. En conjunto, estas cifras reflejan una oferta

flexible en términos de superficie, con un núcleo concentrado en viviendas de tamaño medio, pero con amplitud suficiente para abarcar diferentes necesidades habitacionales.

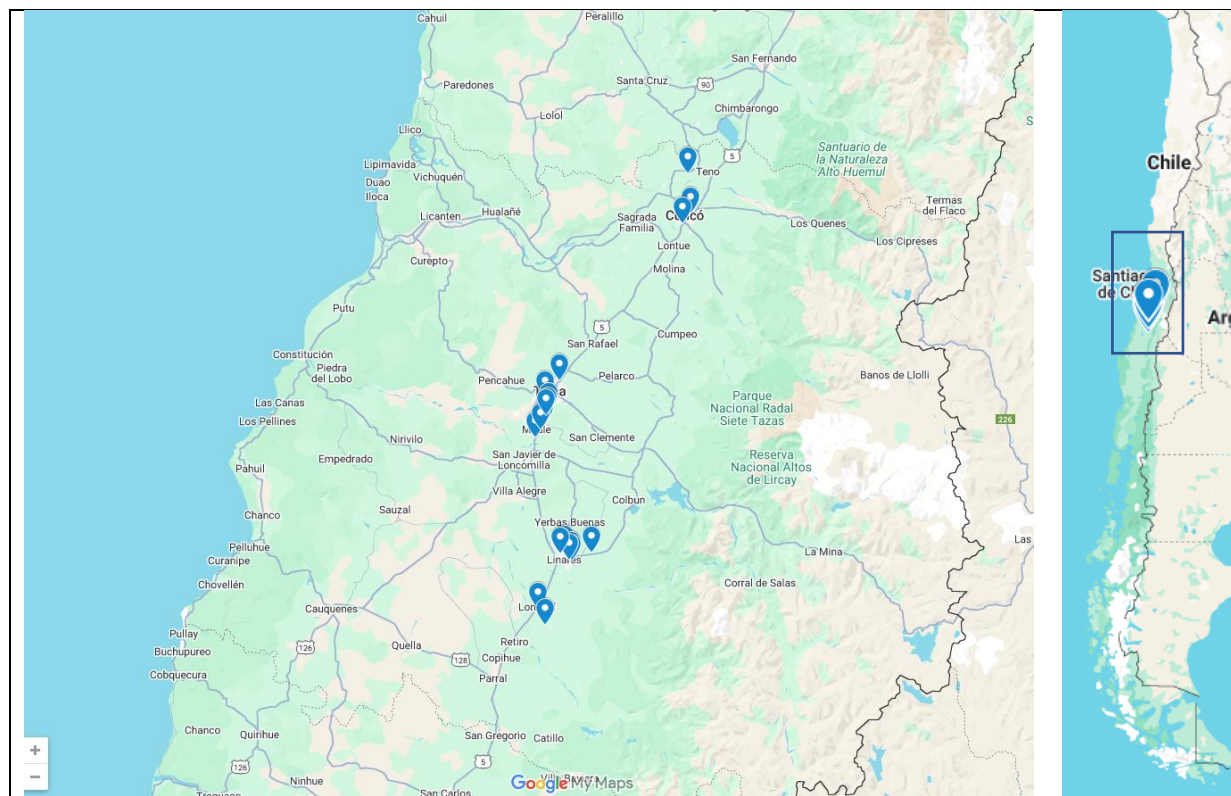


Figura 1. Ubicación de empresas productoras de casas prefabricadas en la Región del Maule

En la totalidad de las empresas analizadas, la madera aparece como material estructural principal. Solo tres empresas indican el uso de soluciones mixtas con Metalcon o albañilería. No obstante, no se informa en ningún caso el tipo de madera a la que corresponde la construcción (aserrada estructural, secada, certificada). El uso de impregnación, aislación o tratamientos técnicos se comunica de forma parcial, lo que impide validar el cumplimiento de requisitos básicos de durabilidad, resistencia y eficiencia energética.

La mayoría de las empresas pone énfasis en rapidez de entrega, variedad de modelos y precios accesibles. Sin embargo, pocas mencionan criterios técnicos diferenciadores como eficiencia energética, estrategias pasivas o innovación en diseño. Tampoco se declara pertenencia a programas de certificación ni uso de materiales con atributos sustentables.

CASA MODELO 72 MTS. 2 AGUAS

KIT BÁSICO \$2.990.000.-

- PANELES EXTERIORES FORRADOS (SIN MEDIA LUNA O TINGLADO)
- PANELES INTERIORES
- C/ FORRO SUELTO EN VOLCANITA
- TODO EN TABIQUERIA 2X3"
- ALTURA DE PANEL 2,40
- TECHO DE ZINC 0,35 - A2-100
- CABALLETES
- MEDIAS LUNAS PARA FRONTONES
- COSTANERAS 1X4" DE PRIMERA
- CERCHAS A 1,30 MTS. REFORZADAS
- INCLUYE PILAR 4X4" (CON PORCHE)

COMPRAS ADICIONALES

VIGAS A LA VISTA EN VOLCANITA	\$ 790.000
FORRO COMPLEMENTARIO + AISLANTE T/A	\$ 690.000
FORRO BAÑO FIBROCEMENTO (PAREDES Y CIELO)	\$ 250.000
CIELO EN VOLCANITA + EMPALIZADO	\$ 550.000
ALERO/TAPACÁN	\$ 490.000
MARCOS DE PINO INSIGNE PARA PUERTAS	\$ 190.000
PUERTA DE PINO OREGÓN	\$ 770.000
KIT DE PUERTAS INTERIORES - TERCiado	\$ 300.000
PISO SOBRE PILOTOS (TERCIADO DE 15 MM)	\$ 1.590.000
VENTANAS DE ALUMINIO (RECTA FRONTAL)	\$ 790.000
VENTANAS DE MADERA (SIN VIDRIOS)	\$ 490.000
VENTANAS DE MADERA (CON VIDRIOS)	\$ 950.000

ADICIONALES MEJORADOS

VIGAS A LA VISTA EN TERCiado R2 O TINGLADO	\$ 990.000
FORRO EN TERCiado R2 O TINGLADO + AISLANTE T/A	\$ 1.790.000
CIELO EN TERCiado R2 O TINGLADO + EMPALIZADO	\$ 1.050.000
KIT PUERTAS INTERIORES - MDF o SINFONIA	\$ 420.000
PISO SOBRE PILOTOS (TERCIADO DE 18 MM)	\$ 1.790.000

KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE ALUMINIO	\$ 10.920.000
KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE MADERA (S/V)	\$ 10.620.000
KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE MADERA (C/V)	\$ 11.080.000

IMPREGNACIÓN

IMPREGNACIÓN EXTERIOR	\$ 790.000
IMPREGNACIÓN COMPLETA	\$ 1.390.000

AGREGA OTROS ADICIONALES

SERVICIO DE IMPREGNACIÓN EXTERIOR Y COMPLETO	
ASILACIÓN T/A ADICIONAL SIMPLE, DOBLE Y TRIPLE EN PISO, PAREDES Y CIELO.	
PISO SOBRE APOYOS DE CEMENTO DE 40 Y 50 CM DE ALTO CON TERCiado DE 15 Y 18 MM	

CONSULTA CON TU EJECUTIVA DE CASAS CURICÓ SPA, SOBRE LOS VALORES VIGENTES PARA ADQUIRIR ESTOS ADICIONALES A TU KIT.

SOMOS LA CALIDAD Y CONFIANZA PARA VIVIR MEJOR

CONTACTANOS: +569 3584 3681, +569 3566 1495, +569 3494 4656

SÍGUENOS: CASAS PREFABRICADAS CURICÓ, CASASCURICO

VALORES VALIDOS HASTA EL MIÉRCOLES, 31 DE ENERO DE 2024.

CASA MODELO 74 MTS. 6 AGUAS

KIT BÁSICO \$3.790.000.-

- PANELES EXTERIORES FORRADOS (SIN MEDIA LUNA O TINGLADO)
- PANELES INTERIORES
- C/ FORRO SUELTO EN VOLCANITA
- TODO EN TABIQUERIA 2X3"
- ALTURA DE PANEL 2,40
- TECHO DE ZINC 0,35 - A2-100
- CABALLETES
- MEDIAS LUNAS PARA FRONTONES
- COSTANERAS 1X4" DE PRIMERA
- CERCHAS A 1,30 MTS. REFORZADAS

COMPRAS ADICIONALES

VIGAS A LA VISTA EN VOLCANITA	\$ 690.000
FORRO COMPLEMENTARIO + AISLANTE T/A	\$ 690.000
FORRO BAÑO FIBROCEMENTO (PAREDES Y CIELO)	\$ 500.000
CIELO EN VOLCANITA + EMPALIZADO	\$ 550.000
ALERO/TAPACÁN	\$ 550.000
MARCOS DE PINO INSIGNE PARA PUERTAS	\$ 220.000
PUERTA DE PINO OREGÓN	\$ 770.000
KIT DE PUERTAS INTERIORES - TERCiado	\$ 350.000
PISO SOBRE PILOTOS (TERCIADO DE 15 MM)	\$ 1.590.000
VENTANAS DE ALUMINIO (RECTA FRONTAL)	\$ 1.090.000
VENTANAS DE MADERA (SIN VIDRIOS)	\$ 850.000
VENTANAS DE MADERA (CON VIDRIOS)	\$ 1.490.000

ADICIONALES MEJORADOS

VIGAS A LA VISTA EN TERCiado R2 O TINGLADO	\$ 890.000
FORRO EN TERCiado R2 O TINGLADO + AISLANTE T/A	\$ 1.990.000
CIELO EN TERCiado R2 O TINGLADO + EMPALIZADO	\$ 1.090.000
KIT PUERTAS INTERIORES - MDF o SINFONIA	\$ 490.000
PISO SOBRE PILOTOS (TERCIADO DE 18 MM)	\$ 1.790.000

KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE ALUMINIO	\$ 12.570.000
KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE MADERA (S/V)	\$ 12.330.000
KIT FULL MEJORADO + VENTANAS DE MADERA (C/V)	\$ 12.970.000

IMPREGNACIÓN

IMPREGNACIÓN EXTERIOR	\$ 990.000
IMPREGNACIÓN COMPLETA	\$ 1.690.000

AGREGA OTROS ADICIONALES

SERVICIO DE IMPREGNACIÓN EXTERIOR Y COMPLETO	
ASILACIÓN T/A ADICIONAL SIMPLE, DOBLE Y TRIPLE EN PISO, PAREDES Y CIELO.	
PISO SOBRE APOYOS DE CEMENTO DE 40 Y 50 CM DE ALTO CON TERCiado DE 15 Y 18 MM	

CONSULTA CON TU EJECUTIVA DE CASAS CURICÓ SPA, SOBRE LOS VALORES VIGENTES PARA ADQUIRIR ESTOS ADICIONALES A TU KIT.

SOMOS LA CALIDAD Y CONFIANZA PARA VIVIR MEJOR

CONTACTANOS: +569 3584 3681, +569 3566 1495, +569 3494 4656

SÍGUENOS: CASAS PREFABRICADAS CURICÓ, CASASCURICO

VALORES VALIDOS HASTA EL MIÉRCOLES, 31 DE ENERO DE 2024.

Figura 2. Ejemplo del catálogo digital 2024 Casas Curicó¹¹ Casas Curicó <https://www.flipsnack.com/casascurico/cat-logo-digital-casas-curic-x90vaqan30.html>

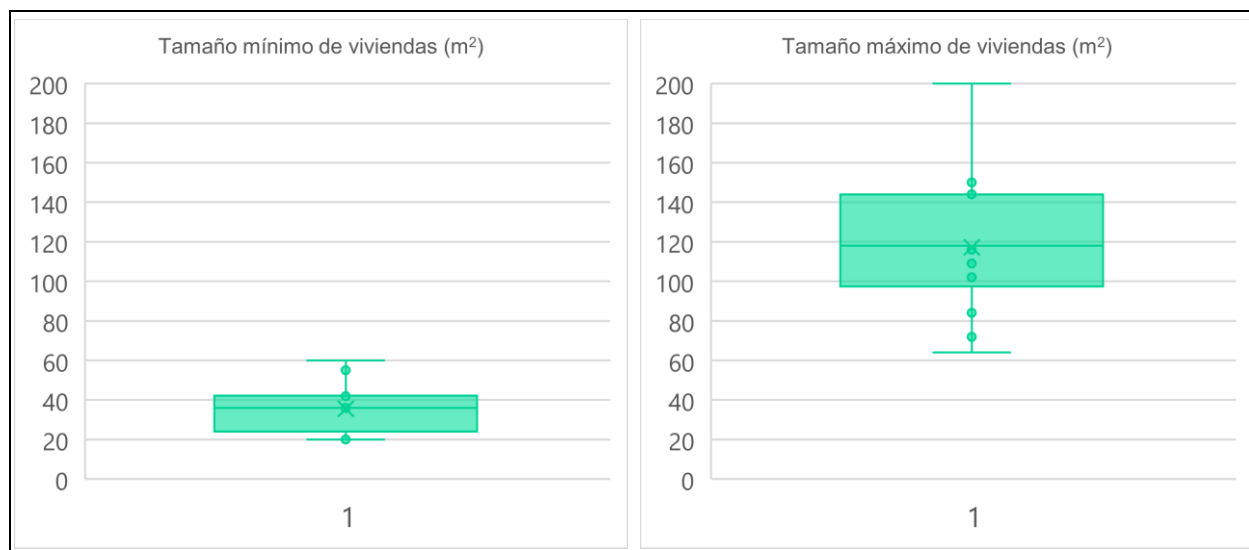


Figura 3. Distribución de superficies habitacionales ofertadas por empresas productoras de casas prefabricadas. (a) Tamaño mínimo. (b) Tamaño máximo.

Atributos Técnicos

Un hallazgo transversal del análisis realizado, es la escasa disponibilidad de información técnica por parte de las empresas de viviendas prefabricadas. De las 21 empresas revisadas en la región, solo una publica catálogos con planos o especificaciones detalladas, mientras que en general la información se limita a fotografías, dimensiones básicas y precios. Esta falta de información impide comparar objetivamente las alternativas disponibles y evaluar su cumplimiento con normas técnicas, especialmente en aspectos como seguridad estructural, eficiencia térmica y condiciones de habitabilidad.

Una empresa declara estar asesorada por arquitecto, mientras que el resto no declara explícitamente contar con profesionales responsables, como arquitectos, ingenieros o constructores civiles, y cuando se menciona la existencia de un “equipo técnico”, no se entregan mayores antecedentes. Esta falta de respaldo profesional debilita la trazabilidad técnica del producto y compromete el vínculo entre el diseño, la ejecución y los estándares mínimos exigibles para una vivienda segura y confortable.

Uno de los aspectos más relevantes en este contexto es el confort térmico, especialmente en regiones con inviernos fríos como Maule, donde la calidad de la envolvente térmica es crucial para la salud de los ocupantes y la eficiencia energética del hogar. Diversos estudios, como los de la [Red de Pobreza Energética \(2019\)](#), advierten que las viviendas con deficiente aislación térmica no solo amplifican la pobreza energética, sino que también incrementan la incidencia de enfermedades respiratorias, problema que se agrava en ausencia de supervisión técnica y diseño adecuado al clima local. Con respecto a lo anterior, una empresa hace alusión a la eficiencia energética, mencionando un servicio de “sellado”, como una mejora al kit de instalación de la vivienda a comercializar.

La revisión de los sitios web confirma estas deficiencias: solo un número muy reducido de empresas hace referencia al cumplimiento de normas técnicas; más bien, se refieren al cumplimiento de la normativa en el proceso de construcción. Cuando se refieren a normas técnicas, normalmente lo hacen de manera vaga; prácticamente ninguna informa sobre el uso de madera estructural clasificada o certificada, tampoco declara sellos de calidad, certificaciones voluntarias o documentación técnica relacionada con la aislación térmica; no incluye información sobre estrategias de diseño pasivo, como orientación solar, ventilación cruzada o protección frente a la radiación. Aunque muchas empresas ofrecen “kits mejorados” o “full”, estos conceptos no están estandarizados y su significado varía según el proveedor, lo que dificulta la comparación entre ofertas y limita la posibilidad de verificar si se cumplen los estándares mínimos de

habitabilidad y eficiencia energética requeridos para enfrentar adecuadamente las condiciones climáticas del territorio.

Modalidades de Venta

Las modalidades de venta incluyen principalmente tres tipos: kit básico, kit con mejoras (componentes extra o mejor calidad) y llave en mano (entrega lista para habitar). Todas las empresas analizadas ofrecen al menos el kit básico; solo un grupo reducido entrega llave en mano. La modalidad de “armado en sitio” aparece como una solución intermedia, donde el proveedor traslada las piezas y realiza el montaje sin incluir instalaciones complementarias. Este esquema implica distintos niveles de responsabilidad técnica y constructiva, siendo la opción llave en mano la que exige mayor profesionalización.

Esto plantea un desafío significativo en cuanto a la trazabilidad técnica y la transparencia de la oferta habitacional en madera, especialmente en un contexto donde la seguridad estructural y la eficiencia energética son condiciones necesarias para una vivienda de calidad.

Evaluación Cualitativa mediante Escala Tipo Likert

En el **Cuadro 2** se presentan los niveles de complejidad y cumplimiento normativo por empresa.

Cuadro 2. Complejidad de oferta y cumplimiento normativo de empresas productoras de casas prefabricadas de la región del Maule (escala 1-5*).

Empresa	Complejidad de la oferta	Cumplimiento normativo
Casas El Mirador	5	2
Casas Baeza	4	1
Casas Vista Hermosa	4	3
Casas Bravo Tobar	3	3
Casas del Maule Prefabricadas	1	1
Casas Azocar	4	3
Casas Valera Ortiz	2	1
Casas Longaví	4	3
Casas El Nevado	5	2
Talca Prefabricadas	5	3
Casas Prefabricadas Los Pinos	4	3
Casas Prefabricadas Rodríguez	5	3
Casas Mi Cabaña	2	1
Casas Eco Linares	3	1
Casas y Maderas Boada & Campos (Linares)	5	3
Chindia Casas Prefabricadas	2	1
Casas Prefabricadas Foresco	5	3
Casas Prefabricadas del Solar	3	1
Casas Prefabricadas Curicó	5	2
Constructora Witrálén	5	3
Casas Prefabricadas Nuevo Horizonte	4	2
Promedio por empresa	3,8	2,1

(*ver caracterización de las categorías 1 a 5 en Cuadro 1)

Los resultados muestran una alta heterogeneidad entre las empresas en cuanto a complejidad de su oferta, entendida como diversidad de modelos disponibles, rangos de superficie, opciones de entrega (*kit* básico, armado o llave en mano) y nivel de personalización. La puntuación promedio de esta dimensión fue de 3,8 puntos, con un rango entre 1 y 5.

Destacan en el extremo superior empresas como Casas El Mirador, Casas El Nevado, Talca Prefabricadas, Casas Prefabricadas Rodríguez, Casas y Maderas Boada & Campos, Casas Prefabricadas Foresco y Constructora Witrálén, todas con puntajes de 5 en complejidad. Esto refleja una oferta amplia, estructurada y versátil, con catálogos claros, variedad de modelos, opciones escalonadas de entrega y, en algunos casos, elementos de personalización. Por el contrario, empresas como Casas del Maule Prefabricadas, Chindia Casas Prefabricadas y Casas Mi Cabaña presentan una oferta acotada, sin catálogos disponibles públicamente, con escasa diferenciación entre modelos y sin especificaciones técnicas visibles, lo que se traduce en puntajes bajos de complejidad (1 o 2).

Respecto del cumplimiento normativo, los resultados son considerablemente más bajos que los de complejidad de oferta. La media general fue de 2,1 puntos, lo que evidencia un rezago importante en la incorporación de estándares técnicos explícitos y verificables en la oferta comercial. Ninguna empresa alcanzó el puntaje máximo; solo algunas como Talca Prefabricadas, Casas Prefabricadas Rodríguez, Constructora Witrálén y Casas Foresco lograron un 3. Estas empresas hacen referencia a aspectos técnicos, como aislación, tratamiento de la madera o tecnologías estructurales, aunque sin declarar explícitamente el cumplimiento de normativas chilenas clave como la NCh433 (resistencia sísmica), NCh1198 (aislación térmica), o certificaciones de madera estructural y rotulado. La mayoría de las empresas (12 de 21 evaluadas) obtiene un puntaje igual o inferior a 2; esto evidencia la ausencia de respaldo técnico público, incluso en casos donde se ofrecen kits que podrían requerir normativas estructurales, de impregnación o eficiencia energética. Esta falta de información dificulta la toma de decisiones por parte de los compradores, como la posibilidad de avanzar hacia una estandarización y profesionalización del sector.

Este análisis muestra una clara brecha entre la sofisticación comercial del producto ofrecido y su respaldo técnico y normativo declarado, lo que genera incertidumbre tanto para compradores como para las políticas públicas que buscan fomentar la construcción sustentable en madera. La presencia de modelos estandarizados en varias empresas sugiere que existen condiciones favorables para avanzar hacia una mayor industrialización del sector, pero ello debe ir acompañado de exigencias mínimas de información técnica verificable y procesos de certificación que aseguren la calidad del producto final.

La **Figura 4** muestra los patrones de oferta de viviendas prefabricadas de las empresas de la región del Maule, en términos de complejidad y cumplimiento; en ella, el gráfico de cajas muestra que los niveles más altos de complejidad en los catálogos de viviendas (niveles 4 y 5) presentan una mayor dispersión en el cumplimiento normativo, aunque con una mediana tendiente al valor 3; esto sugiere una mejora en el cumplimiento a medida que la oferta se diversifica. En contraste, los niveles más bajos de complejidad (niveles 1 y 2) están asociados a valores mínimos de cumplimiento (1), lo que refleja una relación estrecha entre baja sofisticación de la oferta y ausencia de estándares técnicos explícitos. Por su parte, el gráfico de dispersión evidencia una correlación positiva entre ambas variables, aunque con cierta dispersión en los niveles más altos de complejidad, donde no todos los casos presentan un cumplimiento normativo equivalente. Esto sugiere que una mayor complejidad de la oferta tiende a asociarse con mayores niveles de formalización técnica, aunque persisten brechas importantes en algunos casos. Estos resultados muestran la necesidad de fortalecer los mecanismos regulatorios, especialmente en empresas con una oferta más limitada, y de avanzar hacia una estandarización técnica transversal en el mercado de viviendas prefabricadas en madera.

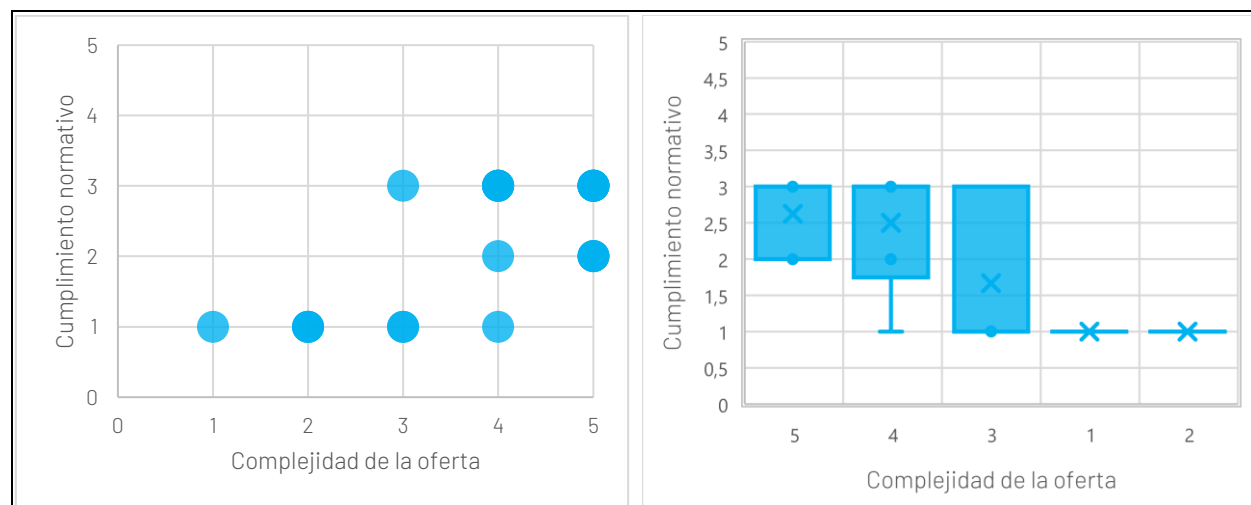


Figura 4. Complejidad de la oferta vs cumplimiento normativo

Respecto del análisis de correlación entre la complejidad de la oferta de viviendas prefabricadas y el nivel de cumplimiento normativo, sugiere una relación estadísticamente significativa y positiva entre ambas variables. El coeficiente de Pearson ($r = 0,68$, $p < 0,001$) indica una correlación moderada a fuerte, mientras que el coeficiente de Spearman ($\rho = 0,62$, $p = 0,003$) confirma esta tendencia en términos de rangos; esto es relevante considerando que ambas variables fueron construidas a partir de una escala ordinal tipo Likert.

Estos resultados respaldan lo observado en los análisis anteriores: las empresas con mayor diversidad, tamaño o complejidad en su catálogo tienden a mostrar mejores niveles de cumplimiento técnico o mayor formalización en la presentación de sus atributos constructivos. Sin embargo, persisten casos donde altos niveles de complejidad no se traducen en un cumplimiento normativo claro o evidenciable, lo que plantea oportunidades para avanzar hacia una estandarización más transparente en el sector.

El uso de la escala tipo Likert permitió ordenar y comparar a las empresas productoras de viviendas prefabricadas, según criterios homogéneos de complejidad de oferta y cumplimiento normativo declarado; sin embargo, su análisis presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, la información fue recolectada exclusivamente desde fuentes públicas (sitios web, redes sociales y catálogos digitales), lo que restringe la evaluación al contenido disponible en línea y puede no reflejar la totalidad de las capacidades técnicas o prácticas constructivas de las empresas. La asignación de puntajes se basó en criterios definidos por el equipo investigador, por lo que, pese a su sistematicidad, incluye un componente subjetivo que podría variar frente a otras metodologías. El cumplimiento normativo fue medido en función de menciones explícitas a normas técnicas o certificaciones, sin verificación documental o técnica directa, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación referencial y no como una auditoría formal del cumplimiento legal.

Análisis Comparado de la Oferta Habitacional en Madera

Esta sección tiene por objetivo contrastar los principales hallazgos del estudio de la región del Maule con los resultados del estudio de [Garay & Benedetti \(2024\)](#) en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Este ejercicio comparativo permite situar la oferta del Maule en un contexto más amplio, reconociendo similitudes, brechas y oportunidades de mejora comunes al mercado habitacional en madera.

Ambos estudios evidencian una alta heterogeneidad en la oferta de viviendas prefabricadas en madera. En Maule, al igual que en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, las empresas ofrecen diversos modelos, con distintos niveles de terminación, servicios y precios. Sin embargo, existen diferencias relevantes: mientras que el estudio de [Garay & Benedetti \(2024\)](#) caracterizó 88 empresas en esas regiones, en Maule se identificaron 21. Aunque el número es menor, el patrón de informalidad, bajo reporte normativo

y escasa transparencia técnica se mantiene en ambos contextos. En las cuatro regiones, predomina la comercialización en modalidad kit, aunque el porcentaje exacto de empresas que ofrecen soluciones llave en mano es menor en Maule.

En términos de atributos técnicos, en ambos casos la mayoría de las empresas no declara cumplir con la normativa vigente ni utilizar madera estructural clasificada. Tampoco se reportan de forma sistemática elementos como aislación térmica, protección contra humedad o certificaciones voluntarias. Esto refleja una carencia transversal en los sistemas de control de calidad, especialmente en segmentos de vivienda que operan por fuera de procesos licitados o programas estatales.

El análisis comparado identifica prácticas que podrían orientar mejoras en la región del Maule. Por ejemplo, en las regiones más urbanizadas como la Metropolitana, algunas empresas han comenzado a incorporar modelos certificados y a asociarse con profesionales del área técnica para facilitar el cumplimiento normativo. Asimismo, se observan mayores niveles de formalización en empresas con más tiempo en el mercado o vinculadas a procesos públicos de construcción.

En este sentido, Maule puede beneficiarse de políticas que incentiven la incorporación de profesionales habilitados, la difusión de buenas prácticas constructivas y la generación de un marco más claro para la estandarización de servicios. Sería relevante fortalecer la educación del consumidor, de modo que la demanda empuje la mejora de estándares técnicos mínimos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de las empresas dedicadas a la producción y comercialización de viviendas prefabricadas de madera evidencia desafíos estructurales en calidad técnica, articulación territorial y cumplimiento normativo. Entre ellos se destacan:

- La industria regional muestra un desarrollo aún incipiente, caracterizado por una alta concentración de microempresas y emprendimientos familiares, con una limitada integración de procesos productivos. Si bien la oferta es diversa en cuanto a modelos, tamaños y acabados, solo una minoría de las empresas evaluadas cuenta con capacidades técnicas para ofrecer soluciones habitacionales completas, con diseño arquitectónico, ejecución llave en mano y cumplimiento de normativa. El potencial de crecimiento es significativo: la región cuenta con abundante materia prima; en 2024 fue la segunda región en términos de producción de madera aserrada (1,78 millones de m³ssc), equivalente al 25 % del total nacional (7,04 millones de m³ssc) (INFOR, 2025); presenta aserraderos en proceso de tecnificación; y una demanda insatisfecha por viviendas sustentables. No obstante, para aprovechar esta base, es indispensable superar la fragmentación actual del mercado y fomentar prácticas colaborativas, formación técnica y formalización empresarial.
- Se requiere articular un sistema regional que permita vincular diseño, fabricación y montaje con estándares nacionales. Actualmente, los eslabones de la cadena de valor, diseño, fabricación, comercialización y montaje operan mayoritariamente de forma fragmentada y sin articulación regional. No existen alianzas sistemáticas entre aserraderos, diseñadores, fabricantes y constructoras; tampoco hay protocolos comunes para asegurar trazabilidad, calidad o cumplimiento de estándares nacionales. Esto limita la posibilidad de crear un sistema territorial de producción de viviendas de madera con valor agregado local. Una articulación adecuada permitiría desarrollar soluciones completas, adaptadas a la realidad de la región, generando empleo de calidad, dinamismo económico y una identidad productiva propia. Iniciativas como los programas formativos en clasificación estructural de INFOR, o los fondos regionales de innovación pueden jugar un rol clave en esta articulación, pero requieren de una estrategia de largo plazo.
- Existe una baja exigencia regulatoria, evidenciada en la falta de información técnica que disponen y presentan los oferentes en sus canales de comercialización. En muchos casos no se especifican

materiales utilizados, tratamientos a los que fue sometida la madera, normativas térmicas ni certificaciones estructurales. Además, hay poca transparencia sobre criterios técnicos mínimos como aislación, hermeticidad o durabilidad de la madera.

- El predominio de modelos de bajo costo, sin aislación adecuada ni sistemas constructivos optimizados, genera un alto riesgo de perpetuar situaciones de pobreza energética en las familias que adquieren estas viviendas. Una aislación térmica deficiente implica mayores consumos asociados a leña, electricidad o gas. Avanzar hacia una construcción en madera eficiente y normada es una condición básica para un desarrollo habitacional justo y sustentable.

Importancia de Mejorar la Regulación y Fiscalización

El desarrollo sostenible del mercado de viviendas de madera en la Región del Maule requiere un fortalecimiento efectivo de los mecanismos de regulación y fiscalización técnica. Actualmente, la ausencia de control sobre estándares constructivos básicos, como aislamiento térmico, resistencia estructural o durabilidad de materiales, ha permitido que existan soluciones habitacionales de baja calidad, sin trazabilidad ni certificaciones verificables. Esta situación no solo afecta la habitabilidad de las viviendas, sino que además genera costos energéticos elevados y pérdida de confianza en la madera como material constructivo.

La informalidad técnica genera una competencia desleal, desincentivando a las empresas que sí invierten en innovación, cumplimiento normativo y mejora continua. Es necesario avanzar hacia un sistema regulatorio más robusto, que combine exigencias mínimas claras con incentivos a la profesionalización del sector. Establecer registros públicos de oferentes, exigir fichas técnicas estandarizadas y promover la articulación institucional regional son medidas clave para consolidar un mercado transparente, eficiente y socialmente justo.

En este contexto, los gobiernos locales y las instituciones públicas como SERVIU, MINVU e INFOR tienen un rol estratégico tanto en la fiscalización, como en la formación, acompañamiento técnico y difusión de buenas prácticas para elevar los estándares del sector y garantizar viviendas dignas, eficientes y adaptadas al territorio. La regulación, no debe ser entendida como una barrera, sino como una oportunidad para fortalecer la industria y mejorar sustantivamente la calidad de vida de las familias maulinas.

Impacto Potencial en la Reducción de la Pobreza Energética

La pobreza energética, entendida como la dificultad de los hogares para acceder a condiciones térmicas adecuadas sin comprometer sus ingresos, representa un desafío estructural para Maule. Estudios recientes indican que esta condición afecta de forma desproporcionada a sectores rurales y periurbanos, donde las viviendas presentan altos niveles de ineficiencia térmica, construidas con materiales no normados o soluciones precarias que requieren uso intensivo de leña para calefacción. En este contexto, el desarrollo de una industria regional de viviendas de madera tecnificada representa una oportunidad concreta para enfrentar esta problemática.

La madera, correctamente utilizada y acompañada de un diseño térmico adecuado, es un material altamente eficiente desde el punto de vista energético. Su bajo coeficiente de conductividad térmica la convierte en un excelente aislante natural, y su capacidad de regular la humedad ambiente contribuye al confort interior. Sin embargo, el impacto real sobre la pobreza energética depende de que las viviendas cumplan ciertos estándares técnicos, particularmente en relación con aislación de la envolvente, control de infiltraciones, orientación solar y compatibilidad con sistemas de calefacción eficientes. Actualmente, las soluciones habitacionales de bajo costo y baja especificación técnica tienden a perpetuar condiciones de pobreza energética.

El potencial de impacto positivo radica en que una mejora sistemática del estándar constructivo de las viviendas de madera —basada en la aplicación efectiva de la norma térmica y el fomento de soluciones industrializadas con control de calidad— permitiría disminuir significativamente las pérdidas térmicas,

reducir el consumo energético y mejorar el bienestar de los hogares. Al tratarse de un material renovable y disponible localmente, la madera permite combinar eficiencia energética con trazabilidad territorial y menores emisiones de carbono en el ciclo de vida de la vivienda.

Para lograr este impacto, es necesario articular políticas públicas que vinculen el desarrollo de la industria maderera con programas habitacionales, subsidios energéticos y exigencias normativas progresivas. Se requiere incorporar evaluaciones de desempeño térmico en los procesos de diseño, fabricación y fiscalización de las soluciones habitacionales en madera.

Una industria regional fortalecida de viviendas de madera eficiente puede convertirse en un instrumento clave para la reducción estructural de la pobreza energética en Maule, especialmente si se orienta hacia modelos de producción integrados, normados y territorialmente adaptados. Esta estrategia permitiría avanzar hacia una vivienda social de calidad, resiliente al clima y accesible para los sectores más vulnerables.

Recomendaciones

La consolidación de un mercado regional de viviendas de madera en el Maule requiere más que el aprovechamiento de la materia prima disponible. Es necesario generar condiciones habilitantes para articular a los actores productivos, elevar los estándares técnicos, formalizar la oferta y conectar el desarrollo del sector con las políticas públicas de vivienda, sustentabilidad y desarrollo territorial. Para tal efecto, se propone una estrategia basada en los siguientes cinco ejes prioritarios:

- Normalización y regulación progresiva de la oferta de viviendas.
- Fomento de encadenamientos productivos regionales.
- Incentivos a la tecnificación e innovación.
- Fortalecimiento de capacidades técnicas locales.
- Integración con políticas habitacionales y regionales.

El fortalecimiento del mercado regional de viviendas en madera no depende únicamente del crecimiento del número de oferentes, sino de su capacidad de entregar soluciones técnicas, normadas, eficientes y conectadas con la realidad territorial. La región del Maule tiene condiciones excepcionales para consolidar un ecosistema de vivienda en madera sustentable, pero ello requiere voluntad institucional, planificación estratégica y cooperación público-privada sostenida.

El sector requiere también una demanda informada, exigente y consciente de los beneficios de una vivienda energéticamente eficiente y construida bajo estándares técnicos adecuados. En Maule, es urgente desarrollar estrategias que empoderen a los usuarios y contribuyan a generar una cultura habitacional más exigente y sustentable.

Una primera línea de acción propuesta es generar acciones de difusión de contenidos educativos y materiales explicativos, que permitan a las personas identificar atributos esenciales de una vivienda eficiente, como el tipo de aislación, uso de madera tratada y cumplimiento de la normativa térmica. Esta información debe presentarse de forma clara, visual y contextualizada para públicos diversos.

En segundo lugar, se propone fortalecer la capacidad de decisión de los consumidores mediante instrumentos simples como *checklists*, fichas técnicas estandarizadas y la creación de un sello de calidad regional que distinga a las empresas que cumplen estándares.

Complementariamente, incentivos económicos o normativos, como mayor puntaje en subsidios o rebajas en permisos de edificación para viviendas normadas, pueden acelerar el cambio cultural y técnico.

Finalmente, proyectos demostrativos exitosos y testimonios de usuarios que habitan viviendas eficientes pueden generar confianza y contribuir a modificar las preferencias de consumo habitacional. Empoderar a la ciudadanía no solo a mejora la calidad de la demanda, sino que impulsa al mercado hacia soluciones sostenibles, seguras y adaptadas al clima y la realidad social del Maule.

REFERENCIAS

- Amino, Y. (2004).** An overview of modern Japanese wood construction – interaction with tradition. Ponencia en el 10º International Holzbau Forum. https://events.forum-holzbau.com/pdf/an_overview-Yoshiaki.pdf
- CIM UC-CORMA. (2023).** Informe Caracterización Regional de la Construcción en Madera: Región del Maule. Centro UC de Innovación en Madera y CORMA. <https://madera.uc.cl/images/recursos/informe-madera-maule-baja.pdf>
- Cognitive Market Research. (2024).** Prefabricated Home Market Report 2024–2031. <https://www.cognitivemarketresearch.com/prefabricated-home-market-report>
- Cognitive Market Research. (2025).** South America Prefabricated Home Market Report 2024–2033. <https://www.cognitivemarketresearch.com/regional-analysis/south-america-prefabricated-home-market-report>
- Déficit Cero & Centro UC de Políticas Públicas. (2022, abril).** Minuta: Estimación del déficit habitacional nacional. https://deficitcero.cl/uploads/estudios/Minuta_EstimaciondelDeficit.pdf
- Fermi, M. J. (2022, 23 de diciembre).** Radiografía a la construcción en madera en Uruguay: desafíos normativos e iniciativas del MVOT. Revista Construcción. <https://www.revistaconstruccion.uy/infraestructura/radiografia-a-la-construccion-en-madera-en-uruguay/>
- Finland.fi. (2019).** The moment for industrial wood building in Finland is right now. This is FINLAND – Produced by the Ministry for Foreign Affairs of Finland. <https://finland.fi/business-innovation/momentum-industrial-wood-building-finland-right-now/>
- Garay-Moena, R. M., & Benedetti, S. (2024).** Calificación de viviendas prefabricadas en madera basada en atributos de cumplimiento normativo, complejidad y sustentabilidad en Chile central. Hábitat Sustentable, 14(1), 92–101. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.07>
- INFOR (Instituto Forestal). (2025).** Anuario Forestal 2025. Boletín Estadístico N° 207. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/33115>
- Madera21. (2023).** Construcción industrializada en madera: Innovación sostenible para Chile. <https://www.madera21.cl/construccion-industrializada-en-madera-innovacion-sostenible-para-chile/>
- MVOT (Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial). (2022).** Hoja de ruta para la construcción de vivienda social en Madera en Uruguay. Gobierno de Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/sites/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/files/documentos/publicaciones/MVOT.%20%282022%29.%20Hoja%20de%20Ruta%20para%20la%20Construcción%20de%20Vivienda%20Social%20en%20Madera%20en%20Uruguay%20%281%29_compressed.pdf
- Ministry of the Environment of Finland. (2020).** Wood Building Programme. Government of Finland. <https://ym.fi/en/wood-building>
- Red de Pobreza Energética. (2019).** Pobreza energética: El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile (Policy Paper N°3). Universidad de Chile, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo. https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/policypaper_redpe20191128.pdf
- Takahashi, Y. et al. (2023).** Environmental impacts of structural lumber production in Japan. Journal of Wood Science. <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-023-02118-w>
- World Bank. (2021).** The construction of timber houses in Chile: A pillar of sustainable development and the agenda for economic recovery. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/512991614664586701/pdf/The-Construction-of-Timber-Houses-in-Chile-A-Pillar-of-Sustainable-Development-and-the-Agenda-for-Economic-Recovery.pdf>



OPINION

El método Miyawaki, expectativa y realidad.

Braulio Gutiérrez Caro^{1*} ¹ Instituto Forestal, sede Biobío. Concepción, Chile. bgutierr@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.667>

Recibido: 30.04.2026; Aceptado: 02.07.2026.

RESUMEN

Se plantea que las expectativas que genera y los resultados esperados de la creación de bosques Miyawaki constituyen una sobreestimación muy considerable de lo que el método puede lograr como herramienta de restauración forestal. Se respalda este planteamiento con argumentos tales como la falta de validación y evidencia científica, escasa representatividad ambiental de las experiencias existentes, costos de implementación, escala de operación, consideraciones ecológicas, de sucesión forestal y otros. Tales consideraciones sugieren que esta metodología es aplicable en proyectos de jardinería o paisajismo urbano o periurbano, ámbito en el cual puede ser de gran valor y generar beneficios altamente valorados por la comunidad, pero que carece de utilidad práctica en iniciativas de restauración de bosques.

Palabras clave: Método Miyawaki, limitaciones, restauración.

SUMMARY

This opinion article argues that the expectations generated by, and the outcomes anticipated from, the establishment of Miyawaki forests constitute a substantial overestimation of what the method can actually achieve as a forest restoration tool. This argument is supported by various attributes of the method, including the lack of validation, the limited environmental representativeness of existing experiences, implementation costs, operational scale, and ecological and forest succession considerations, among others. Such considerations suggest that this methodology is applicable to gardening or urban and peri-urban landscaping projects, where it may provide significant value and generate highly appreciated community benefits, but that it lacks practical utility for forest restoration initiatives.

Key words: Miyawaki method, limitations, restoration

INTRODUCCIÓN

El método Miyawaki de creación acelerada de bosques fue desarrollado por el botánico japonés Akira Miyawaki en la década de 1970 (Jorquera, 2024). Se basa en la plantación densa de especies nativas para crear pequeños bosques (*tiny forests* o bosques de bolsillo) que crecerían hasta diez veces más rápido que los obtenidos con métodos convencionales, logrando la madurez ecológica y autosuficiencia en alrededor de 25 años. Esta atractiva propuesta se ha constituido en una de las estrategias más populares y mediáticamente difundidas, atrae la simpatía de la comunidad, ha ganado mucha visibilidad como estrategia de “reforestación rápida” y ha capturado numerosos seguidores, quienes incluso la sugieren como una alternativa equiparable a iniciativas de restauración tradicionales (Morales *et al.*, 2025).

Sin embargo, a medida que la aplicación del método se ha extendido desde Japón hacia el resto del mundo, han surgido cuestionamientos a sus enunciados y viabilidad. En tal contexto, el presente artículo de opinión plantea que la utilidad real del método Miyawaki, como herramienta de restauración de bosques, es altamente cuestionable; que las expectativas que genera y sus resultados esperados sobrestiman considerablemente lo que el método efectivamente puede lograr en restauración forestal. Este



planteamiento se respalda con información bibliográfica que da cuenta de la carencia de respaldos científicos que confirmen sus postulados, su inviabilidad económica para iniciativas a escala operacional y su incompatibilidad con procesos de sucesión ecológica y diversidad genética de los bosques naturales.

EL MÉTODO MIYAWAKI

El Dr. Akira Miyawaki desarrolló su propuesta para la restauración de bosques templados y subtropicales en Japón, a principios de la década de 1970, a partir del concepto de vegetación natural potencial (PNV) desarrollado originalmente en Europa por el profesor Reinhold Tüxen (Daou *et al.*, 2024). El objetivo principal del método de Miyawaki era restaurar la capa superficial del suelo en los sitios y luego establecer plántulas de las especies del potencial bosque natural del lugar, basándose en estudios fitosociológicos de campo; en síntesis, proponía mejorar las condiciones de calidad del suelo para el posterior establecimiento de especies de árboles intolerantes a la sombra, reconstruyendo el bosque original con árboles nativos de las especies climáticas que existirían en un lugar sin la intervención humana (Daou *et al.*, 2024).

La técnica Miyawaki se caracteriza por: (i) Uso exclusivo de especies nativas adaptadas al clima y suelo local (Zeybek, 2025); (ii) Plantación de alta densidad, que considera hasta 7 o más plantas por metro cuadrado (Morales *et al.*, 2025; Qui *et al.*, 2024; Daniels & Vencatesan, 2021); (iii) Estructura multiestratificada, que combina árboles de distinto dosel y etapa sucesional con especies intermedias, arbustos y cubresuelos (Zeybek, 2025); y (iv) Preparación intensiva del suelo, que incluye excavaciones de hasta un metro de profundidad y la adición de grandes cantidades de materia orgánica (Zeybek, 2025; Jorquera, 2024).

Como la principal ventaja del método, se menciona el hecho de que no sigue la secuencia ni los plazos de la sucesión ecológica, lo que implica que puede producir resultados más rápidos, transformando potencialmente un paisaje desnudo y perturbado en un bosque cuasi-natural en un periodo de entre 15 y 50 años, en lugar de los 200 a 300 años de la sucesión natural. El método recomienda plantar altas densidades de especies arbóreas locales y suspender su manejo activo después de tan solo tres años, lo que permitiría obtener un bosque dominado por especies de árboles tolerantes a la sombra después de 40 a 50 años (Miyawaki & Golley, 1993; Miyawaki, 1999).

Los defensores del método sostienen que estas condiciones permiten un crecimiento hasta 10 veces más rápido que los métodos tradicionales, alcanzando la madurez en apenas dos o tres décadas y logrando la autosuficiencia tras solo tres años de mantenimiento (Morales *et al.*, 2025).

LIMITACIONES DEL MÉTODO

La **ausencia de evidencia científica** es uno de los puntos más críticos señalados por investigaciones recientes, y se refiere a la debilidad de los datos que respaldan la eficacia del método. En esencia, la mayoría de las afirmaciones sobre los beneficios del método Miyawaki para mejorar la biodiversidad o los procesos ecosistémicos no se han probado utilizando diseños experimentales estadísticamente robustos, ya que no incluyen controles ni suficientes réplicas (Safvan & Swapna, 2023).

Al respecto, Morales *et al.* (2025), tras una revisión sistemática de 51 documentos publicados sobre el método Miyawaki, concluyen una muy limitada validación científica y estadística de tales experiencias: menos de la mitad de los casos (41 %) involucraban mediciones cuantitativas de los árboles establecidos; solo siete estudios (14 %) habían considerado grupos de control para comparar el método con otras técnicas de restauración; y apenas en 3 ocasiones (5 %) se habían efectuado réplicas de la experiencia para validar sus resultados.

La afirmación más frecuente en la revisión mencionada (*op. cit.*) es que el método promueve un crecimiento hasta diez veces más rápido ($n = 21$), pero no existen estudios científicos que sustenten estas tasas de crecimiento; también se le atribuye que sus bosques pueden alcanzar la madurez en un periodo de tiempo relativamente corto, de 20 a 30 años ($n = 20$). Sobre esto último, el método plantea saltarse las etapas

iniciales de la sucesión natural para establecer directamente especies intermedias y tardías, en un esquema acelerado que teóricamente reduciría el proceso de siglos a períodos de solo 20-30 años (Kavana, 2023; Morales *et al.*, 2025; Safvan & Swapna, 2023). No obstante, ecólogos forestales argumentan que el concepto de "sucesión acelerada" carece de sentido biológico, ya que la sucesión implica etapas temporales que no son necesariamente simultáneas ni sustituibles por la intervención humana. Adicionalmente, tampoco hay antecedentes de que las plantaciones Miyawaki sigan las etapas sucesionales del bosque que se pretende instaurar (Mundo Forestal, 2025).

Al plantar especies tardías (tolerantes a la sombra) a plena luz y en alta densidad, se genera una gran competencia que favorece solo a los ejemplares mejor adaptados o de crecimiento más agresivo, lo que puede resultar en un sistema poco diverso a largo plazo y alejado de la estructura de un bosque natural maduro (Mundo Forestal, 2025). Esta condición altera directamente la composición y diversidad genética de los bosques creados.

Al respecto, se ha documentado que los bosques Miyawaki pueden presentar una diversidad genética menor que la de los bosques naturales o incluso que las poblaciones de las cuales se extrajeron las semillas. (Daniels & Vencatesan, 2021; Daou *et al.*, 2024). Esto se debe a menudo al uso de lotes de semillas limitados, lo que puede comprometer la resiliencia del ecosistema ante futuras plagas o cambios climáticos (Daou *et al.*, 2024).

Otras aseveraciones atribuidas al método Miyawaki, identificadas en el metaanálisis de Morales *et al.* (2025) son: que los bosques se vuelven autosustentables en un plazo de 3 años ($n=10$); que el método es rentable ($n=9$); que mejora la biodiversidad ($n=8$); que aumenta el secuestro de carbono. No obstante, estas afirmaciones han sido catalogadas como "de escasa evidencia", pues la investigación no las ha confirmado de manera consistente y estadísticamente significativa, en comparación con otros métodos de restauración que no requieren una intervención tan costosa (Morales *et al.*, 2025).

Por otra parte, una alta proporción de los antecedentes que promueven el método no proviene de revistas académicas revisadas por pares, sino de informes de ONG, sitios web de empresas y publicaciones de redes sociales, entre ellos particulares y organizaciones que sobredimensionan las cualidades de estos bosques para comercializar el servicio de instalación de los mismos.

Otra limitación del método es su reducida escala de aplicación, consecuencia de sus elevados costos de implementación. La mayoría de los bosques Miyawaki son parches demostrativos de entre 100 y 5.000 m², dimensiones que, si bien son útiles en entornos urbanos densos, donde el suelo es escaso, resultan insuficientes para abordar la restauración de paisajes rurales degradados a gran escala. Al respecto, existe consenso sobre la imposibilidad de implementar la técnica a mayor escala, sin tener que sacrificar sus enunciados fundamentales de densidad de plantación e intensidad de preparación de suelo. En efecto, el riego y la intensiva preparación del sitio limitan el método al establecimiento de bosques inferiores a 5.000 m², y la descartan como medida de restauración de terrenos rurales degradados (Mundo Forestal, 2025).

La mayor desventaja práctica del método Miyawaki es su costo de implementación, en relación al tamaño de los bosques obtenidos; la técnica es demasiado costosa comparada con métodos tradicionales. Al requerir una densidad de plantación tan alta y una preparación del suelo tan intensiva, sus costos pueden exceder varias veces a los de proyectos de plantación o forestación tradicional. En países asiáticos, la implementación del método tiene un costo que puede variar entre 13.000 y 32.000 US\$/ha, mientras que en el Reino Unido se especifican valores de 287 mil a 1,3 millones de dólares por hectárea (Morales *et al.*, 2025).

En Chile, proyectos financiados por el Gobierno Metropolitano de Santiago han destinado más de cuatro mil millones de pesos para 33 bosques Miyawaki, con un costo promedio superior a 120 millones de pesos por cada bosque de 0,2 a 0,5 ha. El proyecto de mayor superficie (4.000 m²) se estableció en la comuna de Independencia, en el Parque de la Sustentabilidad Juan Antonio Ríos, por un monto de 136 millones de pesos. Otras iniciativas, en las comunas de Cerrillos y Vitacura alcanzan los 1.600 y 300 m² respectivamente, por un monto de 90 millones de pesos. En el Parque Metropolitano Cerros de Renca se

estableció un bosque Miyawaki de aproximadamente mil metros cuadrados a un valor de más de 200 millones de pesos (Mundo Forestal, 2025).

Especialistas forestales señalan que, con los recursos utilizados para un pequeño bosque Miyawaki de 2.000 m² en una zona urbana, se podrían restaurar entre 20 y 70 hectáreas de bosque nativo en zonas rurales utilizando técnicas más eficientes, como la nucleación; equivalentemente, los bosques Miyawaki establecidos por el Gobierno Metropolitano de Santiago alcanzan un costo que permitiría forestar entre 1.000 y 1.500 hectáreas en proyectos de forestación con especies nativas en zonas rurales (Mundo Forestal, 2025). Esta disparidad económica sugiere que el método Miyawaki es menos una herramienta de restauración ecológica y más un ejercicio de jardinería de alto costo.

El método Miyawaki fue diseñado inicialmente para climas templados y subtropicales húmedos de Japón y el sudeste asiático (Daou *et al.*, 2024; Schirone *et al.*, 2011), y su aplicación en otros ambientes, especialmente en climas mediterráneos o áridos, presenta importantes desafíos. La alta densidad de plantas, que en el trópico genera competencia por luz y crecimiento rápido, en climas áridos o mediterráneos se convierte en una severa competencia por el agua del suelo y en elevadas tasas de mortalidad (Schirone *et al.*, 2011). Por lo mismo, especialistas citados en Mundo Forestal (2025) afirman que el método Miyawaki no es costoeiciente para climas mediterráneos; lo reconocen como un método que puede servir en superficies pequeñas, de alto impacto, con riego, donde se puede recuperar ciertos componentes de la biodiversidad local, pero que no califica como un método de restauración, sino más bien como una forma de jardinería ecológica para zonas urbanas y periurbanas.

BENEFICIOS DEL MÉTODO

El método Miyawaki ha sido utilizado en diferentes partes del mundo, por su supuesta capacidad para crear bosques en poco tiempo. Si bien la mayoría de las virtudes atribuidas a este sistema no cuentan con evidencia empírica que las respalde, el método sigue contando con algunas virtudes de valor indiscutible en el ámbito paisajístico urbano y periurbano. En esas condiciones, los minibosques pueden contribuir a mitigar el efecto de isla de calor urbana, reduciendo las temperaturas locales gracias a su densidad de follaje (Zeibek, 2025; Rajadurai, 2024); actuar como barreras acústicas y visuales, filtrando el ruido y la contaminación (Daou *et al.*, 2024; Sandip *et al.*, 2022); y permitir el desarrollo de microhábitats para la biodiversidad urbana (Sandip *et al.*, 2022; Zeibek, 2025), particularmente para insectos, aves pequeñas y polinizadores (Nagajyothi *et al.*, 2025; Zeybek, 2025; Kaushik, 2019), por cuanto su alta densidad, reducida superficie y gran aislamiento los hacen menos apropiados para el movimiento de fauna silvestre de mayor tamaño.

Por otra parte, el método tendría un impacto no menor sobre aspectos sociológicos y psicosociales. Según Daou *et al.* (2024), la plantación de bosques Miyawaki puede concebirse como un acto comunitario, una “festividad” que une a ciudadanos, genera cohesión social y fortalece lazos de pertenencia. Estos minibosques también contribuyen a crear conciencia ambiental y sirven como unidades educativas para que niños y adultos aprendan sobre la naturaleza. Adicionalmente, pueden mejorar la salud mental, mejorar el bienestar psicológico y reducir el estrés de los residentes.

CONCLUSIONES

El método Miyawaki representa un fenómeno complejo con bastante de marketing ecológico y una débil validación científica. Si bien es una herramienta poderosa para reverdecer ciertos espacios y fomentar la participación ciudadana, sus deficiencias como método de restauración de bosques degradados son considerables.

Sus atractivos enunciados carecen de una validación empírica robusta. En términos económicos no resulta eficiente para proyectos de gran escala. Presenta inconsistencias ecológicas al forzar procesos naturales de sucesión y competencia y no cuenta con suficientes experiencias efectuadas en climas mediterráneos.

Para efectos de restauración, parece más adecuado recomendar la implementación de técnicas respaldadas por evidencia sólida y confiable, adaptando los principios de la ciencia forestal a las particularidades propias de los ecosistemas a restaurar. En el caso de iniciativas financiadas con recursos públicos, con mayor razón se deben promover metodologías probadas, confiables y costoeficientes, características que no parecen confluir adecuadamente en el método Miyawaki.

REFERENCIAS

- Daniels, R. & Vencatesan, A. (2021). Why the Miyawaki Method Is Not a Suitable Way to Afforest Chennai. En: <https://science.thewire.in/society/urban/why-the-miyawaki-method-is-not-a-good-way-to-afforest-chennai/>
- Daou, A., Saliba, M., & Kallab, A. (2024). A review of the Miyawaki method. SSRN, 4728239. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4728239>
- Jorquera, C. (2024). Método Miyawaki: cómo la reforestación acelerada recuperó un ecosistema abandonado. En: <https://climatetrackerlatam.org/historias/metodo-miyawaki-como-la-reforestacion-acelerada-recupero-un-ecosistema-abandonado/>
- Kaushik, T. (2019). Miyawaki forests are no substitute for natural ones. En: <https://economictimes.indiatimes.com/news/politics-and-nation/miyawaki-forests-are-no-substitute-for-natural-ones-experts/articleshow/69766810.cms?from=mdr>
- Kavana, G. B. (2023). Miyawaki Forest: Technical Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10680.93441>
- Miyawaki, A. & Golley, F.B. (1993). Forest reconstruction as ecological engineering. *Ecological Engineering*, N°2. Pp: 333–345. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(93\)90002-W](https://doi.org/10.1016/0925-8574(93)90002-W)
- Miyawaki, A. (1999). Creative Ecology: Restoration of Native Forests by Native Trees. *Plant Biotechnology*, 16(1): 5-25. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.16.15>
- Morales, N. S., Fernández, I. C., Durán, L., & Craven, D. (2025). Tiny forests, huge claims: The evidence gap behind the Miyawaki method for forest restoration. *Journal of Applied Ecology*, 00, e70242. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70242>
- Mundo Forestal. (2025). Bosques Miyawaki. ¿Técnica basada en ciencia o solo un producto del marketing? *Revista Mundo Forestal* N° 48, junio 2025. Pp: 20-30.
- Nagajyothi G., Pratheeksha, C. & Amreen Taj, A. (2025). Miyawaki Forest: An Urban Restoration Technique. *Agri Articles (e-Magazine for Agricultural Articles)*, 5(3): 332-338.
- Qi, H., Dempsey, N., & Cameron, R. (2024). Seeing the forest for the trees? An exploration of the Miyawaki forest method in the UK. *Arboricultural Journal*, 46(4), 292–304. <https://doi.org/10.1080/03071375.2024.2394355>
- Rajadurai, P. J. (2024). Assessing the sociological impact of the Miyawaki method on urban health and environment. *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, 8(9), 3360–3367. <https://doi.org/10.47772/IJRISS>
- Sandip, R., Sharma, P. & Modi, N. (2022). Development of Tree Plantation Through Miyawaki Method at Sabarmati Riverfront Development Corporation Limited - A Research. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 1(1): 163-174. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v1i1.31>
- Safvan, V. K., & Swapna, T. S. (2023). Assessment of biodiversity and growth parameters of Miyawaki Forest of selected sites in Thiruvananthapuram District of Kerala. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3192725/v1>
- Schirone, B., Salis, A. & Vessella, F. (2011). Effectiveness of the Miyawaki method in Mediterranean forest restoration programs. *Landscape and Ecological Engineering*, 7, 81–92. <https://doi.org/10.1007/s11355-010-0117-0>

Zeybek, O. (2025). Evaluating the Miyawaki Afforestation Technique in Urban Landscapes: Opportunities and Challenges. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, 13 (1), 313-337. DOI: 10.15320/ICONARP.2025.326 <https://doi.org/10.15320/ICONARP.2025.326>





www.infor.cl
<https://revista.infor.cl>