



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
INGENIERÍA FORESTAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA EN SITIOS CON  
POTENCIAL PRODUCTIVO DE MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de  
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero Forestal

POR: Francisco Alejandro Toledo Palma

Profesor Guía: Juan P. Elissetche Martínez

Profesor Asociado: Pablo A. Mena Quijada

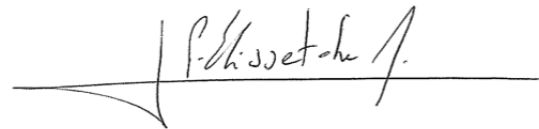
Diciembre, 2023

Concepción, Chile

© 2023, Francisco Alejandro Toledo Palma

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

CARACTERIZACIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA EN SITIOS CON  
POTENCIAL PRODUCTIVO DE MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL



Profesor Guía

---

Juan Pedro Elissetche Martínez

Profesor Asociado

Ingeniero Forestal, Dr.



Profesor Guía

---

Pablo Alejandro Mena Quijada

Colaborador Externo

Ingeniero Forestal, Dr.

## **DEDICATORIA**

A mi familia por el apoyo continuo en las diferentes etapas de mi vida.

A mi amigos más cercanos por su amistad y preocupación en los momentos difíciles.

A todos los profesores por su entrega en las aulas de clases, laboratorios y terrenos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a la Facultad Ciencias Forestales por haberme formado, así también a los diferentes docentes, secretarías y auxiliares que fueron parte de este proceso directa o indirecta.

A mis profesores guías Juan Pedro Elissetche y Pablo Mena, lo cuales me permitieron desarrollar el tema de tesis y por la entrega de sus conocimientos.

A mis compañeros de facultad, los cuales me ayudaron más de una vez en los diferentes cursos.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. METODOLOGÍA .....	2
2.1 Descripción del área de estudio.....	2
2.2 Información edafoclimática y dasométrica de los sitios.....	3
2.3 Inventario forestal de los sitios.....	3
2.4 Material vegetal .....	3
2.5 Determinación de la densidad básica .....	6
2.6 Estimación de la densidad básica media al DAP .....	8
2.7 Rendimiento estructural.....	9
2.8 Análisis estadísticos de los datos .....	9
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
3.1. Variación de la densidad básica entre los tipos de madera .....	11
3.2. Variación de la densidad básica entre los tipos de madera con relación al sitio de procedencia.....	13
3.3 Rendimiento estructural en cada sitio .....	15
3.4 Relación entre la densidad básica y las variables a nivel de sitio .....	16
3.4.1 Variables climáticos vs densidad básica.....	17
3.4.2 Variable de suelo vs densidad básica.....	21
3.4.3 Variable dasométrica vs densidad básica.....	22
3.5 Variación del inventario forestal en los diferentes sitios .....	24
3.6 Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica .....	26
IV. CONCLUSIONES .....	31
GLOSARIO.....	33
V. BIBLIOGRAFÍA .....	34
VI. APÉNDICE .....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

### En el texto

Tabla 1. Información del inventario forestal realizado en los diferentes sitios muestreados.

### En el Apéndice

Apéndice 1. Característica climática, suelo y dasométrica de cada sitio, según la procedencia de las muestras de madera. ....	40
Apéndice 2. Variación de densidad básica en las diferentes muestras de madera. ....	42
Apéndice 3. Variación de densidad básica a nivel de sitio, en las diferentes muestras de madera. ....	42
Apéndice 4. Coeficientes de correlación entre las variables climáticas, suelo y dasométrica, y las medias de densidad básica al DAP, madera juvenil, madera transición y madera madura. ....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los principales procesos relacionados en la formación de la madera, incluyendo la absorción del agua desde las raíces y transpiración en las hojas, captación del carbono atmosférico desde los estomas de las hojas y posterior asimilación en la pared de las células del xilema. (Fuente: <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92698-4_3">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92698-4_3</a> ). .....	4
Figura 2. Esquema de los tipos de madera según los anillos de crecimiento (corte transversal de <i>Pinus radiata</i> ). .....	6
Figura 3. Ubicación geográfica de los rodales plantados con <i>Pinus radiata</i> , de los cuales se obtuvieron las muestras de madera. ....	2
Figura 4. Extracción de tarugo de incremento al DAP de 12 mm de diámetro. ...	4
Figura 5. Muestras de tarugo de incremento de madera <i>Pinus radiata</i> . ....	5
Figura 6. Procedimiento de obtención de las muestras de madera para el estudio. ....	6
Figura 7. Procedimiento para la determinación del volumen en estado ( $V_v$ ) de la madera, mediante el método de inmersión en agua según la norma Finlandesa SCAN-CM 43 (1989). ....	7
Figura 8. Distribución de los datos de densidad básica al DAP, madera juvenil, madera de transición y madera madura. ....	11
Figura 9. Rango de variación de densidad básica en las diferentes muestras de madera en cada sitio. ....	14
Figura 10. Variación entre las medias de densidad básica desde la madera juvenil a madera madura. ....	15
Figura 11. Variación del rendimiento estructural en la primera troza aserrable en cada sitio. ....	16
Figura 12. Regresión lineal entre la densidad básica y los factores climáticos a nivel de sitios. A) Rango medio mensual temperatura máxima y mínima. B) Temperatura máxima mes más cálidos (°C). C) Temperatura media anual (°C).	



D) Temperatura mínima mes más frío (°C). E) Precipitación media anual (mm).  
.....20

Figura 13. Regresión lineal entre la densidad básica y materia orgánica (%). ..21

Figura 14. Regresión lineal entre la densidad básica e índice de densidad del  
rodal (SDI). .....23

## RESUMEN

En 16 sitios plantados con *Pinus radiata* D. Don. de edad superior a los 22 años, ubicados entre las regiones del Maule y Biobío, Chile. Se determinaron el rendimiento estructural (RE) y la densidad básica (DB) de la madera, y se establecieron relaciones con variables climáticas, suelo y dasométrica. Se seleccionaron nueve árboles por sitio y se les extrajo un tarugo de incremento de 12 mm de diámetro a la altura del DAP. El tarugo fue dividido en tres secciones; madera juvenil desde la médula hasta el octavo anillo de crecimiento; madera de transición, comprende desde el noveno anillo hasta del décimo quinto; y madera madura, se extiende desde el décimo sexto anillo hasta la corteza. La DB media entre sitios en la madera juvenil varió de 377,1 a 423,7 kg m<sup>-3</sup>, en la madera de transición, osciló entre 393,4 y 512,1 kg m<sup>-3</sup>, mientras que en la madera madura fue de 429,2 a 537,4 kg m<sup>-3</sup>. La DB media al DAP varió de 398 a 483,5 kg m<sup>-3</sup>. En cuanto al RE, fluctuó entre 12% y el 25% entre los diferentes sitios. Al correlacionar las DB medias de las muestras con las variables climáticas, suelo y dasométrica, se observó una fuerte relación con la DB de la madera de transición y madera madura. La DB mostró una correlación significativa con el rango medio mensual temperatura máxima y mínima, la temperatura máxima del mes más cálido (°C) y la temperatura media anual (°C). Por otro lado, se encontró un efecto positivo con la materia orgánica (%) y el índice de densidad de plantación sobre la densidad básica.

## ABSTRACT

In 16 sites planted with *Pinus radiata* D. Don, aged over 22 years, located between the Maule and Biobío regions, Chile. The Structural performance (RE) and basic density (DB) of the wood, and relationships were established with climatic, soil and dasometric variables. Nine trees per site were selected and an increment of 12 mm diameter at DBH was extracted. The dowel was divided into three sections; juvenil wood from the pith to the eighth growth ring; transitional wood, from the ninth ring to the fifteenth; and mature wood, from the sixteenth ring to the bark. The mean DB between sites in juvenil wood ranged from 377.1 to 423.7 kg m<sup>-3</sup>, in transition wood it ranged from 393.4 to 512.1 kg m<sup>-3</sup>, while in mature wood it ranged from 429.2 to 537.4 kg m<sup>-3</sup>. Mean DB at DBH ranged from 398 to 483.5 kg m<sup>-3</sup>. As for the RE, it fluctuated between 12% and 25% among the different sites. When correlating the mean DB of the samples with climatic, soil and dasometric variables, a strong relationship was observed with the DB of transition wood and mature wood. The DB showed a significant correlation with the mean monthly maximum and minimum temperature range, the maximum temperature of the warmest month (°C) and the mean annual temperature (°C). On the other hand, a positive effect was found with organic matter (%) and plantation density index on basic density.



## I. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales en Chile con especies introducidas durante el año 2019 ocupaban 2.32 millones de hectáreas (ha), de los cuales 1.3 millones ha correspondían a la especie *Pinus radiata* D. Don. Las plantaciones forestales se ubican desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Lagos, concentradas en el Maule, Biobío y La Araucanía (Soto Aguirre *et al.* 2021).

*Pinus radiata* presenta múltiples usos en la industria forestal primaria, participa en la industria de la pulpa y papel, aserrío, astillas, tableros y chapas, postes y polines (Gysling *et al.* 2006). Durante el año 2019, *P. radiata* aportó el 97,2% de la materia prima en la industria de la madera aserrada con una producción anual de 8 millones de m<sup>3</sup> (Alvarez y Poblete 2020). En general, las trozas destinadas en la producción de madera aserrada comercial deben cumplir con un largo mínimo de 4,1 m y diámetro  $\geq 28$  cm (Büchner *et al.* 2018), lo cual plantea un desafío desde el punto de vista de productividad y manejo silvícola.

Los productos derivados de la madera han sido ampliamente utilizados en la construcción de viviendas y edificaciones, ya que presentan múltiples productos que son clasificados con uso estructural y no estructural (Gysling *et al.* 2020). La madera es un material higroscópico, capaz de absorber o entregar agua según las condiciones de temperatura y humedad relativa en el ambiente (Hislop *et al.*

1999). Las piezas de mayor porosidad presentan mejores cualidades acústicas y térmicas, siendo utilizada como madera de apariencia. En cambio, las piezas de menor porosidad poseen mejores propiedades mecánicas, capaz de resistir cargas externas sin deformarse (Suirezs y Berger 2009). Esta última, tiene por consiguiente un grado estructural mayor y, por lo tanto, la madera de menor porosidad tiende a situarse como madera deseable para la construcción.

La madera aserrada estructural (MAE), es empleada para soportar cargas en muros y techos. Como material de construcción, debe cumplir con requisitos sobre dimensión, humedad, durabilidad y características mecánicas de resistencia (Gysling *et al.* 2021). Para este último, existen diferentes métodos y normas de clasificación para la madera, algunos se basan en el módulo de elasticidad (MOE) o rigidez de material, aunque, puede variar para cada país (Vásquez *et al.* 2019). En Nueva Zelanda, los atributos de mayor interés en los árboles destinados a la producción de MAE, son: el diámetro menor de la troza (cm), diámetro de las ramas más grandes (mm), rigidez (GPa) y densidad básica ( $\text{kg m}^{-3}$ ), respectivamente (Alzamora y Apiolaza 2013).

La densidad básica (DB) de la madera, según la norma finlandesa SCAN.CM 43 (1989), se define como la relación entre la masa de la probeta en estado seco (peso anhidro) y el volumen en estado verde (saturado en agua). Es un importante indicador de calidad que impacta sobre las propiedades del producto

final maderable derivado de las especies forestales. Se encuentra relacionado con el rendimiento y calidad de la pulpa para el papel (Kibblewhite y Hamilton 1984). Resistencia, dureza y rigidez, medido a través del módulo de Young, en la madera exterior (Chauhan y Walker 2006).

La formación de la madera (o xilogenesis) (Figura 1) incluye los procesos de división celular a partir desde el cambium, elongación de las células y engrosamiento de la pared celular. La pared de las células del xilema presenta tres diferentes capas; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub>, teniendo en consideración que el espesor de la capa S<sub>2</sub>, es altamente variable (Hislop *et al.* 1999). Las células que componen la madera poseen un espacio vacío denominado “lumen”, siendo la pared celular la encargada de otorgar el peso al material en relación con su volumen (Larson 1969). A través del proceso de fotosíntesis, los árboles transforman la energía lumínica en energía química utilizada para formar los compuestos (carbohidratos) en la formación de la madera. La luz activa la apertura estomática, donde se genera el intercambio gaseoso. El CO<sub>2</sub> es captado de la atmosfera y empleado en la formación de polisacáridos, estructuras que forman parte de la microfibrilla de celulosa, principal componente de la pared celular (Carril 2011), bajo ciertas condiciones de radiación, temperatura y disponibilidad de agua, los árboles inician la etapa de crecimiento con la elongación de las yemas apicales, encargadas del crecimiento primario. Las hormonas del crecimiento liberadas por las yemas apicales, promueve la división celular en el cambium, formando células

de madera temprana con transición a madera tardía (Larson 1969). El cambium situado cerca de los órganos foliares presenta mayor vigor debido a la acumulación de hormonas, formando madera temprana con células de lúmenes grandes y paredes delgadas, hasta la base de los árboles. Luego, la madera tardía procede con la reducción del diámetro de las células y el aumento del espesor de la pared celular. En conjunto ambos forman el anillo de crecimiento anual (Larson 2001). Las características de los anillos de crecimiento le confieren las propiedades mecánicas a la madera formada.

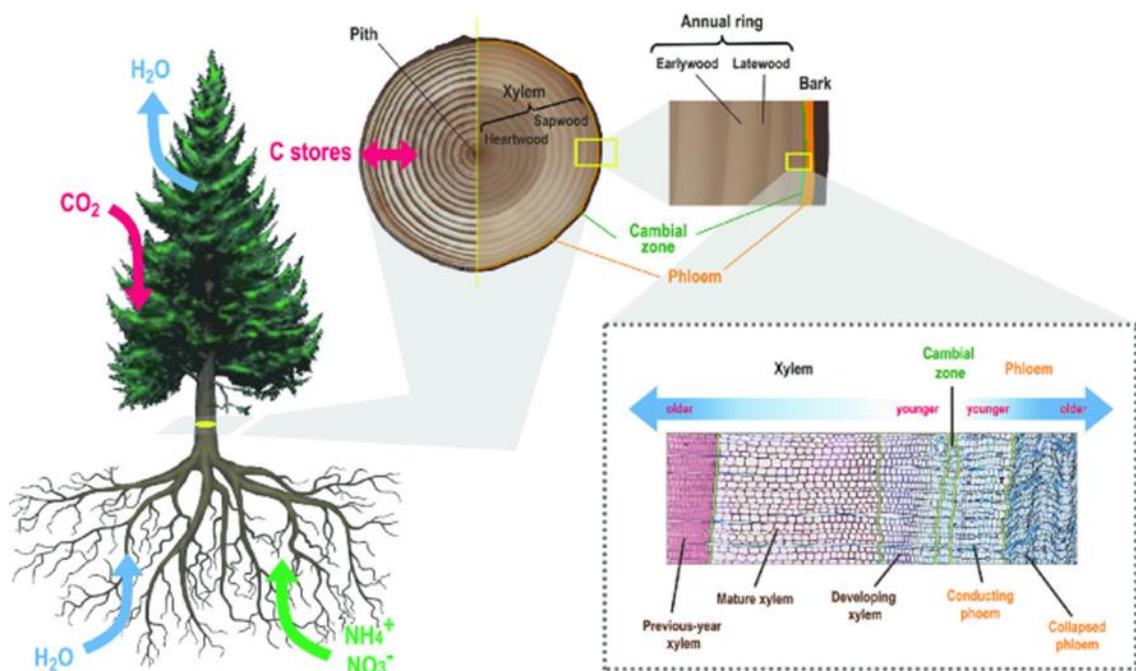


Figura 1. Esquema de los principales procesos relacionados en la formación de la madera, incluyendo la absorción del agua desde las raíces y transpiración en las hojas, captación del carbono atmosférico desde los estomas de las hojas y posterior asimilación en la pared de las células del xilema. (Fuente: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92698-4\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92698-4_3)).



La madera localizada en el centro del árbol se describe como madera juvenil. Por su formación en los primeros estadios de crecimiento del árbol, presenta mayor diámetro en los anillos de crecimiento, alta proporción de madera temprana y aumenta su proporción en altura. La madera madura, madera de más reciente formación y localizada en la zona más cercana a la zona cambial y corteza, presenta menor diámetro en los anillos de crecimiento y aumenta la proporción de madera tardía (Figura 2) (Lebourgeois 2000). Por esta razón, se suele observar un acelerado aumento en la densidad desde la médula hasta la corteza, llegando a valores casi constante a medida que aumenta el diámetro de los árboles (Dias *et al.* 2018). La madera madura se ve influenciada por el envejecimiento del cambium y/o tamaño de la copa activa. Los árboles con mayor tamaño de copa, medido a través del peso seco total de las hojas (kg), tienden a presentar una menor proporción de madera tardía, lo que repercute sobre las propiedades de la madera (Amarasekara y Denne 2002).

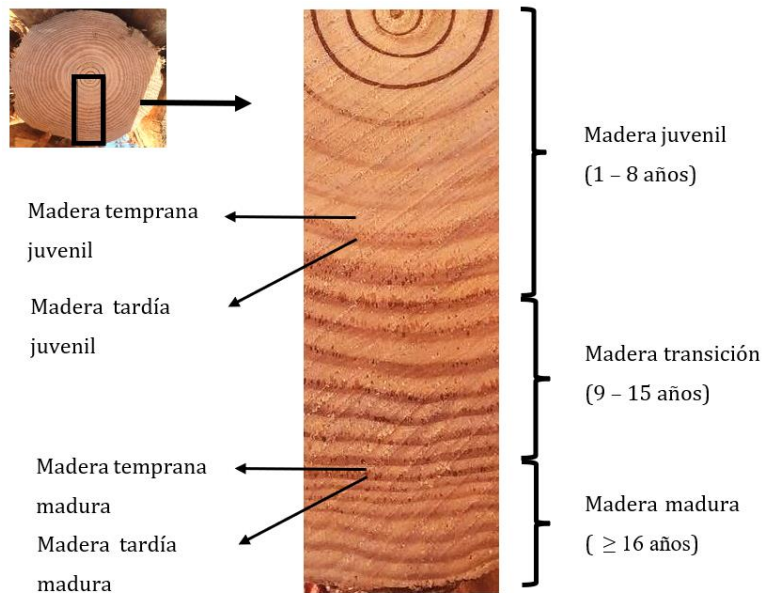


Figura 2. Esquema de los tipos de madera según los anillos de crecimiento (corte transversal de *Pinus radiata*).

En Chile, se han desarrollado diversos estudios que permiten conocer la edad de cambio entre la madera juvenil y madera madura. Un trabajo más detallado fue realizado por Zamudio *et al.* (2002) evaluaron a 31 familias de *P. radiata*, en un huerto de progenie (o semi siembra). Basado en el ancho y densidad promedio de los anillos de crecimiento, los autores dan a conocer que la madera juvenil termina entre los 8 a 12 años. Por otro lado, Ivković *et al.* (2013), en un cultivo de *P. radiata* en Australia, señalan que el efecto de la edad cambial se reduce en los anillos de crecimiento después de los 15 años. No obstante, a medida que aumenta el número de los anillos, la madera tiende a presentar un comportamiento más homogéneo (o asintótico), con respecto a las propiedades

de la madera, entre ellas: la densidad básica, ancho del anillo y porcentaje de madera tardía (Roque *et al.* 2003; Barrios *et al.* 2016).

La densidad básica de la madera es altamente variable entre especies, entre árboles y en cada árbol. Por lo tanto, la densidad de la madera se encuentra influenciada por la edad de plantación, prácticas silvícolas (podas y raleos) y condiciones edafoclimáticas del sitio, las que determinan las tasas de crecimiento diametral de cada individuo (Louzada 2003; Palmer *et al.* 2013; Barrios *et al.* 2016).

Muchos aspectos del crecimiento de los árboles son altamente heredables o pueden ser manipulados por la silvicultura. Por parte de la industria, se ha focalizado en aumentar la productividad mediante mayores tasas de crecimiento volumétrico y maximizar el diámetro del rodal a periodos de corta cada vez más reducidos. Sin embargo, el rápido crecimiento de los árboles puede afectar sus propiedades internas, incluyendo la densidad básica (Schimleck *et al.* 2018). Por esta razón, es necesario implementar medidas que permitan optimizar la tasa de crecimiento en conjunto con las propiedades de la madera.

Downes *et al.* (2002) estudiaron el efecto de la aplicación de fertilizantes sobre las propiedades de la madera en *P. radiata*. La fertilización realizada durante el período de formación de madera madura generó una leve reducción en la

densidad básica de la madera sin afectar la rigidez. En cambio, la fertilización en conjunto con el raleo reduce en gran medida la densidad básica y rigidez. Carson *et al.* (2014) estudiaron las prácticas silvícolas sobre las propiedades de la madera en Nueva Zelanda, donde se evidenció que la densidad del rodal posee una correlación positiva sobre la densidad de la madera. El adecuado manejo de la densidad rodal permite manipular tanto el rendimiento como la calidad de la madera.

Los efectos de las prácticas silvícolas sobre la densidad de la madera son variados, sin embargo, si la proporción relativa de madera temprana aumenta de densidad promedio disminuye; en cambio, si aumenta la proporción relativa de madera tardía la densidad aumenta (Larson 1969).

Respecto a las condiciones edafoclimáticas, las más relevantes que afectan la densidad básica de la madera son; temperatura atmosférica medias, humedad del suelo, latitud y altitud (Larson 2001; Palmer *et al.* 2013; Dias *et al.* 2018). Además, las condiciones del sitio tienen un efecto directo sobre la calidad de la madera madura (Cown *et al.* 1992).

En Nueva Zelanda, se han desarrollado diversos trabajos que permiten predecir la variación geográfica de la densidad de la madera para *P. radiata*. Palmer *et al.* (2013) por medio de las variables; temperatura media anual del aire (°C),

radiación solar total ( $\text{Kj día}^{-1}$ ), precipitación total media anual (mm) y edad, buscaron explicar el comportamiento de la densidad básica para 1.214 sitios, siendo la edad y temperatura media anual del aire las que explicaban en gran medida el comportamiento de la densidad básica de la madera. Por otro lado, Beets *et al.* (2007) desarrollaron un modelo basado en la densidad básica de la madera en los últimos 50 mm cerca de la corteza, en 17 sitios plantados con el mismo lote de semilla. Dicho modelo utilizó las variables de temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ), relación carbono-nitrógeno (C:N) del suelo y edad, el cual explicó en un 93% la variación total. Larson (1969) señala que la humedad del suelo tiene un efecto directo sobre el crecimiento de los árboles, el porcentaje de madera tardía y el tamaño de los anillos de crecimiento, los cuales tiene un efecto directo sobre la densidad de la madera.

En Chile, las plantaciones productivas de *P. radiata* se ubican en la transición de clima mediterráneo a clima templado lluvioso. Las precipitaciones presentan un marcado cambio latitudinal con aumento de norte a sur, concentradas en la temporada de invierno y los períodos secos que varían entre 1 a 7 meses. Además, la presencia de la cordillera de la costa provocado microclimas en muchas zonas del territorio (Gerding y Schlatter 1995; Flores y Allen 2004), donde las zonas ubicadas con exposición oeste se ven favorecidas por la humedad relativa generada por la cercanía al mar, mientras que las zonas ubicadas en la

cordillera de los Andes se ven favorecidas por la acumulación de aguanieve (Roco *et al.* 2015).

Son escasos los estudios que vinculan los cambios en la densidad básica de la madera con respecto a las condiciones edafoclimáticas. Barrios *et al.* (2016) desarrollaron una investigación para cuantificar el efecto del medio ambiente sobre la densidad básica, proporción de madera tardía y otras propiedades de la madera, en tres sitios plantados con el mismo material genético. En ella, se observó diferencias significativas entre la madera juvenil y madera madura, no obstante, el bajo tamaño muestral hace difícil extrapolar a la amplia distribución de las plantaciones. Watt y Trincado (2019), mediante las variables de temperatura media anual del aire (°C), buscaron explicar el comportamiento de la densidad básica en 31 sitios plantados con edad entre 10 y 14 años, concluyendo que los sitios con temperaturas cálidas y suficiente disponibilidad de agua tendrán un mayor período de crecimiento y mayor proporción de madera tardía.

El desarrollo de las plantaciones forestal implica una amplia gama de condiciones de sitio, que incluyen diferentes tipos de suelo, topografía, temperatura y precipitaciones anuales. Esto puede afectar la productividad y calidad de la madera producida (Mead 2013).

## Objetivo

Conocer y caracterizar la variación en la densidad básica y rendimiento estructural de acuerdo con variables ambientales y dasométricas en la primera troza con dimensiones estructurales en rodales adultos de *Pinus radiata* D. Don.

## II. METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se basó en un subconjunto de 16 sitios plantados con *P. radiata*, establecidos entre los años 1995-1998. Los sitios presentan una amplia distribución en el rango latitudinal, desde la comuna de Vichuquén (límite norte de la región del Maule), hasta la comuna de Curanilahue (límite sur de la región del Biobío). Propiedad de Forestal Arauco y Constitución S.A (Figura 3).

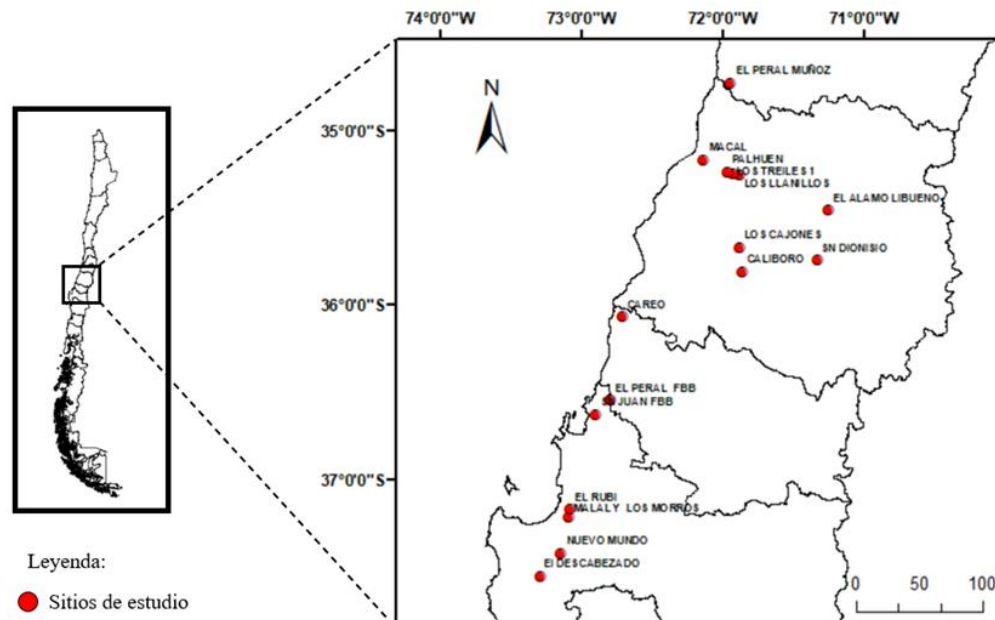


Figura 3. Ubicación geográfica de los rodales plantados con *Pinus radiata*, de los cuales se obtuvieron las muestras de madera.



## 2.2 Información edafoclimática y dasométrica de los sitios

Entre sitios se tiene una amplia variación con respecto a las condiciones climáticas y del suelo (Apéndice 1). La información climática (temperatura media anual (°C), temperatura máxima del mes más cálido (°C), temperatura mínima del mes más frío (°C) y rango medio mensual entre temperatura máximo y mínimo), suelo (materia orgánica (%)) y dasométrica (Índice de densidad de rodal) de cada sitio, fue proporcionada por la empresa BIOFOREST S.A., las variables climáticas fueron obtenidas del sitio AGROMET mediante los registros históricos de los últimos 30 años.

## 2.3 Inventario forestal de los sitios

Durante el año 2021 se efectuó el inventario forestal en los diferentes sitios muestreados, obteniéndose la información sobre la densidad media del rodal (arb ha<sup>-1</sup>), área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) (cm).

## 2.4 Material vegetal

En cada sitio se establecieron tres parcelas y se seleccionaron tres arboles por parcela, asociados a las clases diamétricas menor, mayor y promedio. Los árboles seleccionados presentaron buen aspecto sanitario y no tenían inclinación

con respecto a la posición vertical. Se les extrajo a cada árbol un tarugo de 12 mm de diámetro a 1,3 m sobre el suelo (DAP) (Figura 4).



Figura 4. Extracción de tarugo de incremento al DAP de 12 mm de diámetro.

Una vez extraídos los tarugos, las muestras fueron rotuladas y envueltas en papel alusa foil para evitar la pérdida de humedad, y puestas en un cooler. Luego, estas fueron llevadas al Laboratorio Silvotecnológico de la Madera (LSTM) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, para su procesamiento (Figura 5).



Figura 5. Muestras de tarugo de incremento de madera *Pinus radiata*.

En primera instancia, se revisó el estado de los tarugos, se les retiró la corteza y se procedió a localizar la zona de la médula o la más concéntrica, observando los anillos de crecimiento. Una vez localizada la zona de interés, se realizó un corte transversal en las muestras de madera, ocupando un mazo de goma y un cuchillo cartonero, lo que generó 2 probetas, y permitió seleccionar la muestra más representativa del crecimiento de los árboles, obteniéndose un total de 144 muestras. Posteriormente, se realizó determinación y marcación de los anillos de crecimiento para clasificar las muestras de madera según su ubicación en el árbol. La madera se clasificó en tres secciones; se consideró como sección de madera juvenil (J) los primeros 8 anillos desde la médula, la sección de madera de transición (T) desde el anillo 9 hasta el número 15 y la sección de madera madura (M) desde el anillo 16 hasta el resto de la probeta (Figura 6), cada una

identificada adecuadamente. (Algunas probeta no logramos generar 3 secciones).

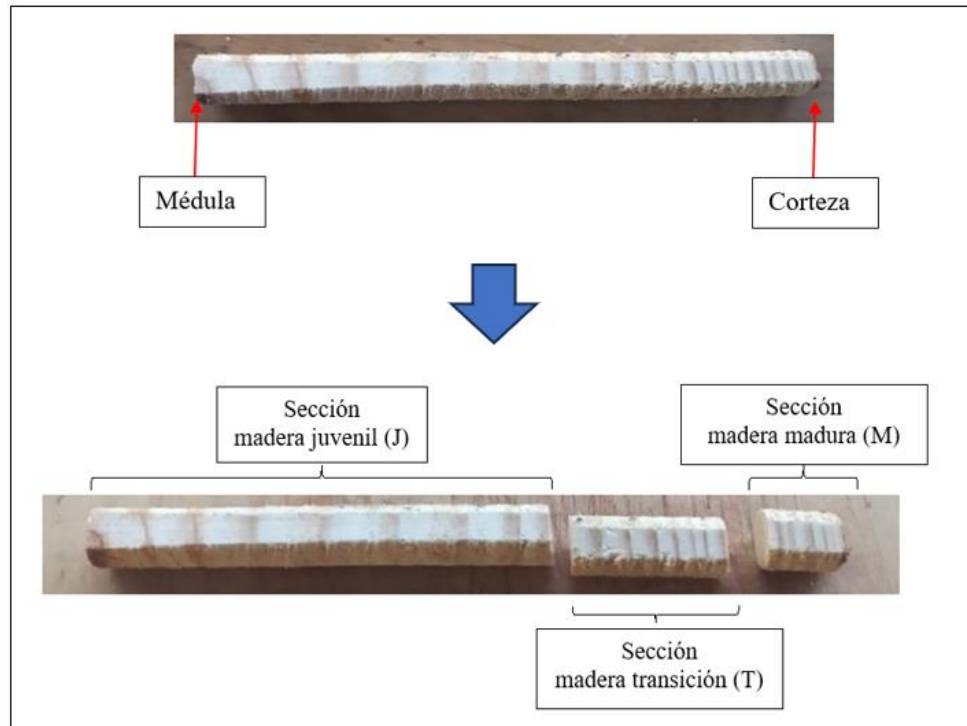


Figura 6. Procedimiento de obtención de las muestras de madera para el estudio.

## 2.5 Determinación de la densidad básica

Una vez cortadas y etiquetadas las probetas, se mantuvieron en bandejas con agua durante tres días (72 horas). Posteriormente, las muestras fueron sometidas en un sistema de extracción de aire mediante vacío durante 10 a 15

minutos en una campana de vidrio con agua, para conseguir que las muestras se mantuvieran completamente saturadas con agua. Luego, se determinó el volumen en estado verde mediante el método de inmersión en agua como lo indica la norma Finlandesa SCAN-CM 43 (1989), para la determinación de densidad básica de la madera (Figura 7).



Figura 7. Procedimiento para la determinación del volumen en estado ( $V_v$ ) de la madera, mediante el método de inmersión en agua según la norma Finlandesa SCAN-CM 43 (1989).

Una vez determinado el volumen en estado verde, se obtuvo el peso anhidro ( $P_o$ ) llevando las muestras de madera al horno de secado, donde se mantuvieron a una temperatura constante a  $80^{\circ}\text{C}$  y fueron pesadas diariamente en una balanza con precisión de  $0,01\text{g}$  hasta conseguir un peso constante.

Los cálculos para la determinación de la densidad básica, se realizó mediante la ecuación (1), y para poder realizar los análisis estadísticos fue necesario una conversión de los datos mediante la ecuación (2).

$$DB = \frac{Po}{Vv} \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (1)$$

$$DB = \frac{g}{cm^3} \times \frac{1 Kg}{1.000 g} \times \frac{1.000.000 cm^3}{1 m^3} \quad (2)$$

$$DB = 1.000 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

Donde:

*DB* : Densidad básica (kg m<sup>-3</sup>).

*Po* : Peso anhidro (kg).

*Vv* : Volumen en estado verde (m<sup>3</sup>)

## 2.6 Estimación de la densidad básica media al DAP

Mediante la relación entre la densidad básica de la madera juvenil (J), madera de transición (T) y madera madura (M), con respecto al área transversal a la altura del DAP, el cual se obtuvo mediante el largo de los tarugos representativo del

radio de cada sección, se calculó el área perteneciente a cada muestra de madera, logrando estimar la densidad básica a la altura del DAP, asumiendo la forma de un cilindro perfecto, mediante la ecuación (3).

$$DB \text{ ponderada al DAP} = \frac{(Db_J \times Area_J) + (Db_T \times Area_T) + (Db_M \times Area_M)}{(Area_J + Area_T + Area_M)} \quad (3)$$

## 2.7 Rendimiento estructural

Se utilizó una función de rendimiento estructural (RE) proporcionada por Forestal Arauco. Esta función fue construida con información de ensayos industriales, donde se caracterizaron trozos de dimensión estructural y se determinó la densidad básica de cada uno. La función utiliza como variables explicativas el diámetro JAS del trozo (cm) y la densidad básica promedio del trozo ( $\text{kg m}^{-3}$ ), mediante la ecuación (4).

$$RE = -34.5169 + 0.4271 \times Djas + 0.08914 \times DB \quad (4)$$

## 2.8 Análisis estadísticos de los datos

Se calcularon los valores medios de densidad básica en las diferentes muestras (madera juvenil, madera de transición y madera madura), y por cada sitio. Junto

con ello se estimó la densidad básica media de la sección transversal del fuste a la altura del DAP. Los análisis fueron realizados con el software RStudio.

Se relacionó la densidad básica media de la madera juvenil, madera de transición, madera madura y DB media al DAP, con las diferentes condiciones climáticas, suelo y dasométrica del Apéndice 1, mediante el sistema de matriz de correlación. Este sistema mide el grado de relación lineal entre cada par de variable en el rango  $[-1, 1]$ , siendo los valores extremos lo que indican una mayor relación entre las variables. Se obtuvieron los coeficientes de correlación y determinación a un nivel del 1% de confianza.

Para el rendimiento estructural se utilizó los valores del diámetro JAS proporcionado por BIOFOREST S.A., en cada sitio. Además, se compararon las diferencias del RE entre sitios.



### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Variación de la densidad básica entre los tipos de madera

La distribución de los datos de DB en la madera de *Pinus radiata* en las diferentes muestras de madera, se encuentran en la Figura 8. La DB media al DAP presentó un valor de  $447,6 \text{ kg m}^{-3}$ , en la madera juvenil se obtuvo un promedio de  $401,5 \text{ kg m}^{-3}$ , y para la madera de transición y madera madura las medias fueron  $457,7$  y  $493,1 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente. En el Apéndice 2, se entregan los valores de coeficiente de variación, desviación estándar, n total, máximo y mínimo.

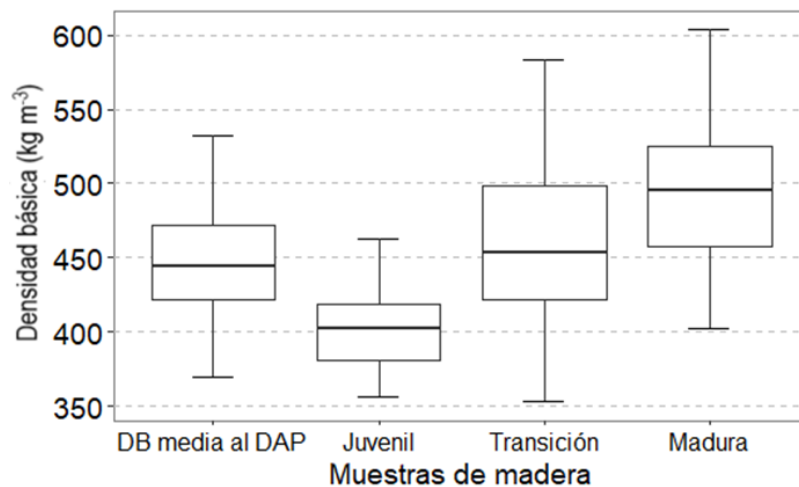


Figura 8. Distribución de los datos de densidad básica al DAP, madera juvenil, madera de transición y madera madura.

Al comparar las medias entre la madera juvenil, madera de transición y madera madura, se observó un aumento de la DB desde la madera juvenil hacia la madera madura. La variación en la densidad de la madera se encuentra regulada por el tamaño de las células y el espesor de la pared celular (Hislop *et al.* 1999). En cuanto al crecimiento radial en los anillos de crecimiento siguen un patrón decreciente de médula a corteza, sin embargo, la proporción de madera tardía exhibe un patrón creciente de médula a corteza (Barrios *et al.* 2016; Dias *et al.* 2018). La madera tardía, se caracteriza por presentar células de menor tamaño vascular y mayor espesor en la pared celular en comparación con la madera temprana (Larson 1969). La variación entre la madera temprana y madera tardía en los anillos de crecimiento explica la variación de la densidad básica en las diferentes muestras de madera.

En Nueva Zelanda, Cown y Ball (2001) realizaron mediciones para cuantificar el porcentaje de madera tardía en siete regiones plantadas con *Pinus radiata*. El porcentaje de madera tardía en la madera juvenil osciló entre el 4 y el 10%, mientras que para la madera madura fue del 6 a 45%.

### 3.2. Variación de la densidad básica entre los tipos de madera con relación al sitio de procedencia

Referente al comportamiento de la DB en las diferentes muestras de madera obtenidas a la altura del DAP, en la Figura 9 se observan los rangos de DB en los diferentes sitios muestreados. Los valores medios de DB al DAP oscilaron entre 398 (Caliboro) y 483,5 kg m<sup>-3</sup> (Sn. Juan FBB). En la madera juvenil, las medias fluctuaron entre 377,1 (Caliboro) y 423,7 kg m<sup>-3</sup> (Sn. Juan FBB). Para la madera de transición, las medias fueron 393,4 (Caliboro) a 512,1 kg m<sup>-3</sup> (El Peral FBB). Y en la madera madura, las medias variaron entre 429,2 (Caliboro) y 537,4 kg m<sup>-3</sup> (Malal y Los Morros). En el Apéndice 3, se entregan los valores medios, coeficiente de variación, desviación estándar y n total en cada sitio.

En la mayoría de los sitios se observó un acelerado aumento de DB desde la madera juvenil hasta la madera de transición, con aumento progresivo hasta la madera madura. La variación de las medias de DB en los diferentes sitios, desde la madera juvenil hasta la madera madura, fue de 87,5 kg m<sup>-3</sup>, con valores que oscilaron entre 40 (Los Treiles 1) y 126,7 kg m<sup>-3</sup> (EL Descabezado) (Figura 10).

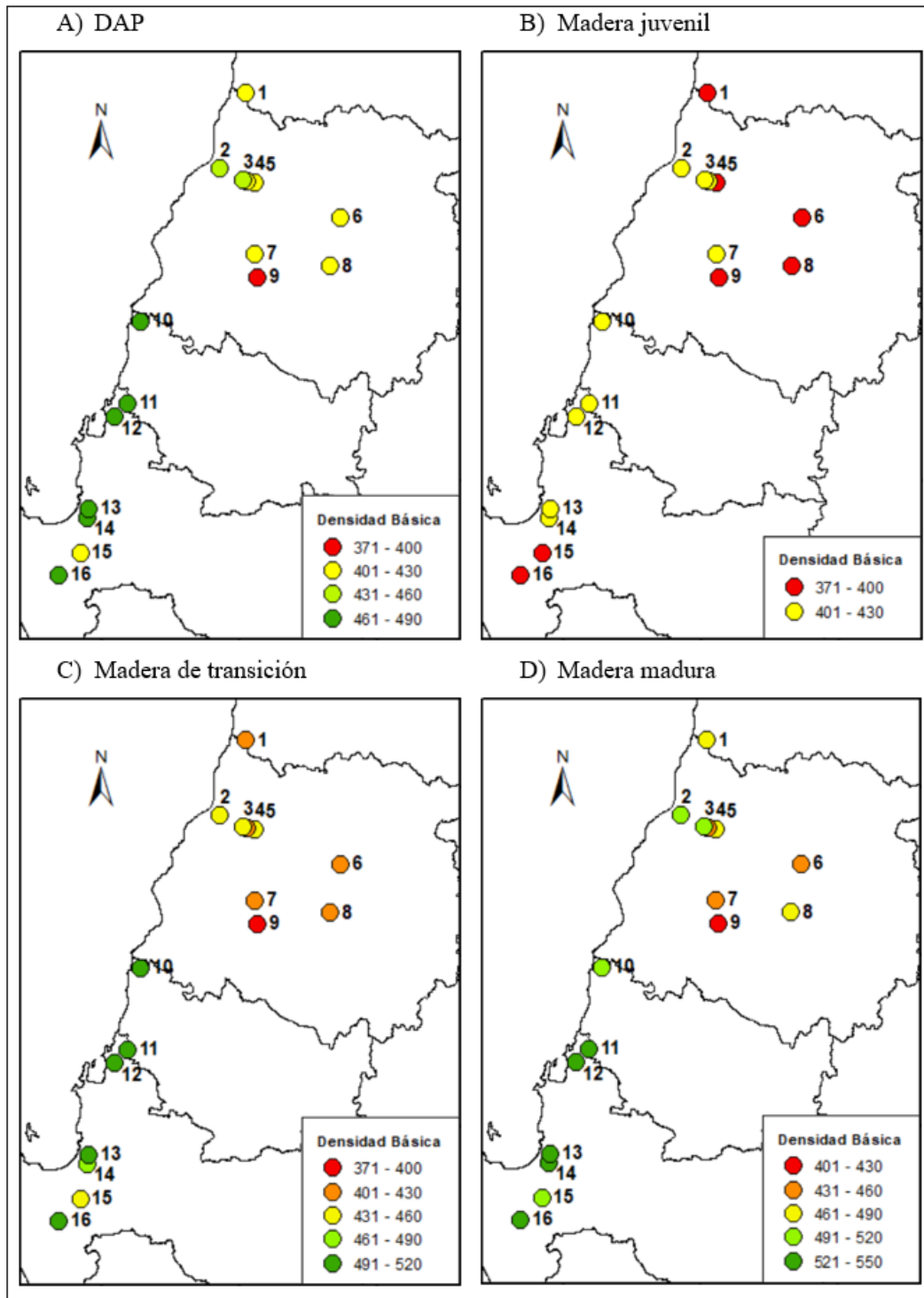


Figura 9. Rango de variación de densidad básica en las diferentes muestras de madera en cada sitio.

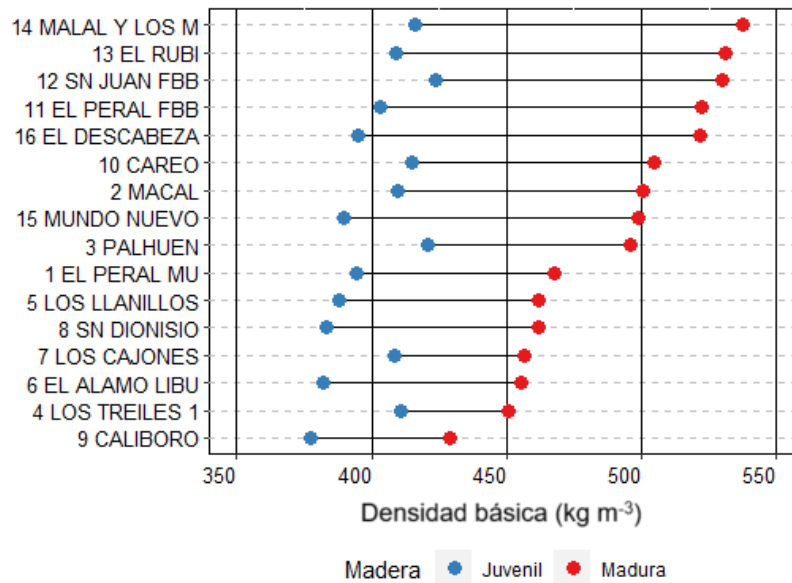


Figura 10. Variación entre las medias de densidad básica desde la madera juvenil a madera madura.

### 3.3 Rendimiento estructural en cada sitio

Por medio del diámetro JAS proporcionado por BIOFOREST S.A. y la DB media al DAP, se caracterizó el rendimiento estructural de cada sitio, véase la Figura 11. Siendo Careo (25%) y Sn Juan FBB (24%) los sitios de mayor rendimiento estructural, en cambio, El Peral Muñoz (13%), Caliboro (13%) y Los Treiles 1 (12%) presentaron los menores rendimientos estructural.

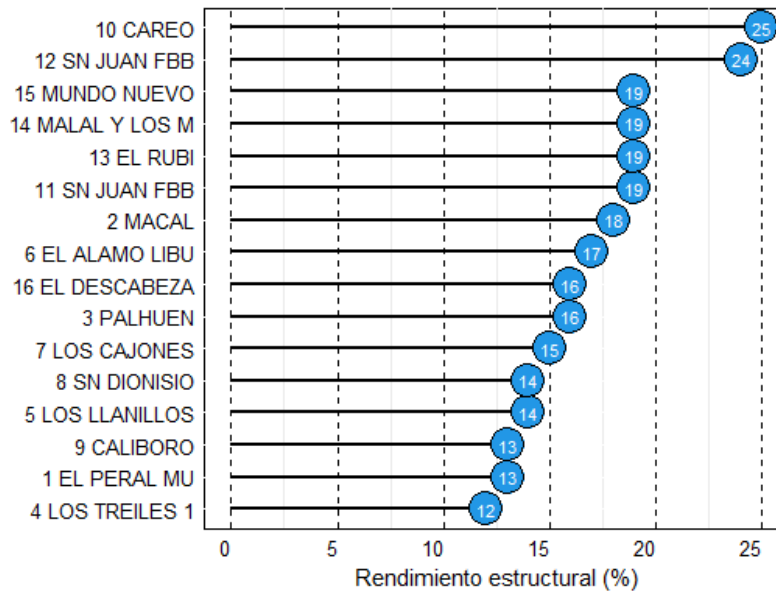


Figura 11. Variación del rendimiento estructural en la primera troza aserrable en cada sitio.

### 3.4 Relación entre la densidad básica y las variables a nivel de sitio

Se llevaron a cabo múltiples matrices de correlación (Apéndice 4) entre las variables del Apéndice 1 y los valores medios de DB al DAP, madera juvenil, madera de transición y madera madura de cada sitio. Se observó una fuerte correlación entre las variables del Apéndice 1 y la DB de la madera de transición y madera madura.

Finalmente, se realizaron varios análisis de regresión simple entre los valores de DB de la madera madura y las variables de la Apéndice 1, para evaluar la relación de las climáticas, suelo y dasométrica sobre la DB de la madera madura.

#### 3.4.1 Variables climáticas vs densidad básica

Los resultados estadísticos significativo de las variables climáticas se muestran en la Figura 12 A, B, C, D y E, respectivamente. En las regresiones lineales, se observó que las variables; rango medio mensual temperatura máximo y mínimo, temperatura máximo del mes más cálido (°C) y temperatura medio anual (°C), presentaron una correlación negativa con respecto a la densidad básica de la madera madura. Esto indica que a medida que las temperaturas aumentan, hay una disminución en la DB, posiblemente impulsa por la variación térmica durante los meses más cálidos. La temperatura mínima del mes más frío (°C) mostró una tendencia positiva débil, observando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) inferior en comparación con las demás variables de temperatura. Por otro lado, la precipitación media anual (mm) presentó una relación positiva débil con la DB de la madera madura.

La DB se relacionó fuertemente con las variables de temperatura similar a lo encontrado en la literatura previa. Sin embargo, las investigaciones realizadas en Nueva Zelanda sugieren que los árboles cultivados en zonas cálidas con suelos

relativamente secos durante el verano producen madera más densa en comparación con las zonas de temperaturas más bajas y suelos excesivamente húmedos (Beets *et al.* 2007; Palmer *et al.* 2013). Aunque el territorio de Nueva Zelanda se encuentra situado entre los paralelos 37° y 45° latitud Sur, esta investigación se limita a un rango más específico, 34° 43" (El Peral Muñoz) y 37° 31" (El Descabezado) latitud Sur.

Respecto a la temperatura máxima del mes más cálido, los sitios con los valores de DB más bajos son Caliboro y Los Treiles 1 (31 y 27 °C, respectivamente), mientras que los valores de DB más altos se encuentran en El Rubí y Malal y Los Morros (23 y 23 °C, respectivamente).

El efecto de las altas temperaturas ocasiona estrés por deshidratación en los árboles. Como medida para evitar la pérdida de agua, se produce el cierre estomático en las hojas, lo que afecta la absorción de CO<sub>2</sub>, reduce la actividad fotosintética, y disminuye el crecimiento de los árboles y la producción de madera (Thompson y Wheeler 1992). En general, las altas temperaturas aumentan el efecto de la evapotranspiración en el suelo, lo que reduce el agua disponible en las plantaciones. En períodos más prolongados, se producen cambios morfológicos en los árboles, como la reducción en altura, diámetro y copa activa, lo que afecta el área basal en las plantaciones forestales (Waghorn *et al.* 2015), afectando el periodo de formación de madera tardía de alta densidad básica.



Producto del cambio climático, fenómeno ampliamente reconocido, se observa en muchas zonas del territorio nacional un aumento en las temperaturas medias, una disminución de las precipitaciones y/o reducción en los ciclos de lluvia, lo que resulta en un aumento de los periodos de sequía. Esta tendencia sigue un patrón latitudinal de norte a sur y afecta principalmente a las zonas del valle central (Alvarado y Zabaleta 2010; Roco *et al.* 2015).

Los árboles cultivados en zonas con limitaciones hídricas presentan mayor biomasa en las raíces a expensas de los brotes. Indirectamente, las células de la madera temprana presentan cambios anatómicos viéndose reducido el diámetro de las células (Larson 1969), lo que resulta en madera con células de menor tamaño vascular. Respecto a la precipitación, el modelo de crecimiento realizado por Flores *et al.* (2004) describe disminuciones drásticas en la productividad de *P. radiata* en zonas con una precipitación inferior a 400 mm anuales. En este estudio, la menor precipitación media anual es de 582 mm (El Peral Muñoz), lo cual es superior a la precipitación necesaria para afectar el crecimiento en las plantaciones. Por otro lado, en Australia, las plantaciones de *P. radiata* establecidas en condiciones ambientales de carácter mediterráneo se benefician de las lluvias durante la temporada de verano, lo que favorece el crecimiento de los árboles y resulta en un aumento en el diámetro de los anillos de crecimiento,

específicamente durante el período de formación de madera tardía (Ivković *et al.* 2013).

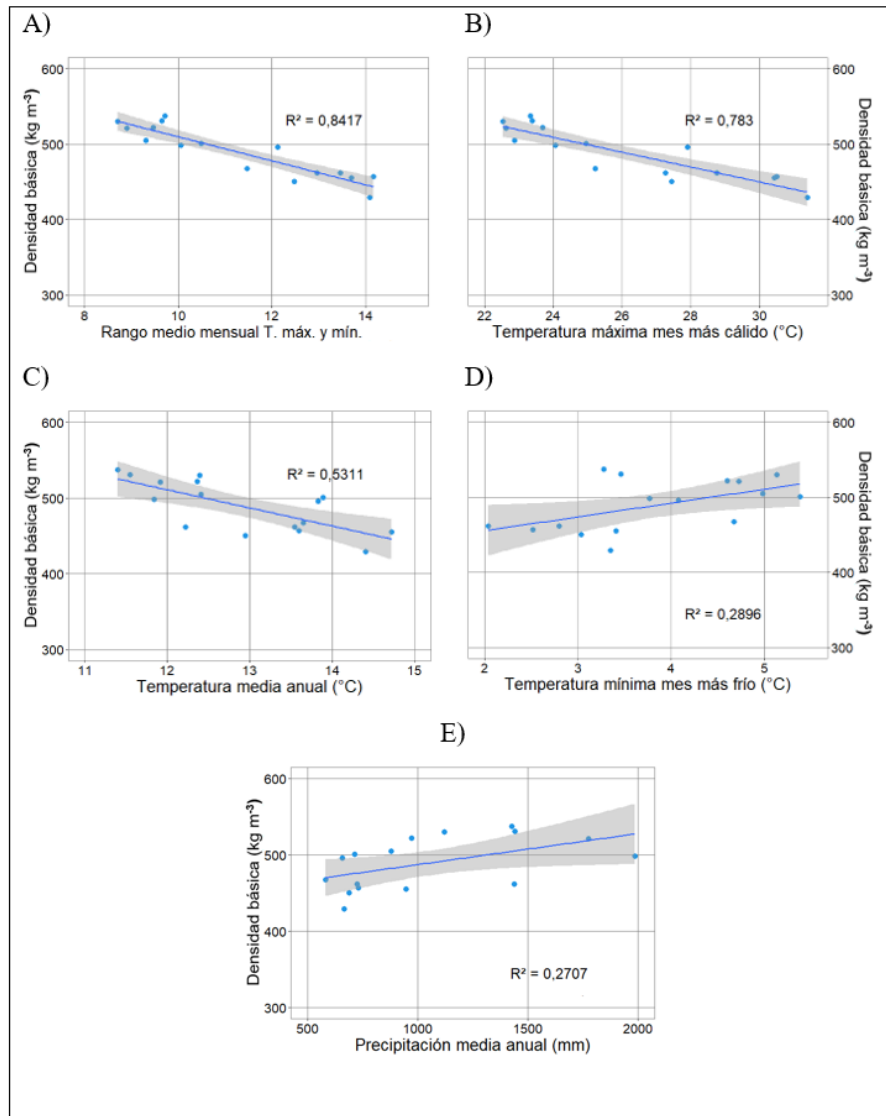


Figura 12. Regresión lineal entre la densidad básica y los factores climáticos a nivel de sitios. A) Rango medio mensual temperatura máxima y mínima. B) Temperatura máxima mes más cálidos (°C). C) Temperatura media anual (°C). D) Temperatura mínima mes más frío (°C). E) Precipitación media anual (mm).

### 3.4.2 Variable de suelo vs densidad básica

La Figura 13, se muestra la regresión lineal entre materia orgánica (%) y DB de la madera madura. Se observó una correlación positiva, lo que sugiere un aumento de la DB a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica en el suelo.

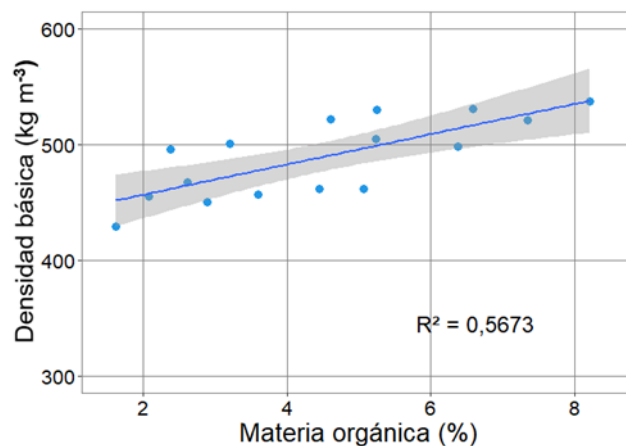


Figura 13. Regresión lineal entre la densidad básica y materia orgánica (%).

Las características del suelo han sido utilizadas como variables predictoras de la densidad básica de la madera en diversos estudios. Por ejemplo, el modelo predictor desarrollado por Beets *et al.* (2007), utilizó la relación C:N del suelo en los primeros 5 cm de profundidad. En Chile, la investigación realizada por Watt *et al.* (2019) para modelar la influencia del medio ambiente sobre la DB de la

madera juvenil se encontró una fuerte relación entre las variables del suelo y la variación de la DB, por sobre las variables climáticas. Específicamente, se observó una relación significativa con el contenido de boro (B) y la relación C:N del suelo en el horizonte A, aunque la relación entre el boro y la DB ha sido poco estudiada.

La materia orgánica es el principal reservorio y suministro de nutrientes en el suelo. La descomposición de la materia orgánica, provenientes de residuos gruesos como ramas y corteza, a largo plazo permite la reincorporación de nutrientes como calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg). Además, la descomposición de las acículas verdes caídas sobre el piso forestal contribuye a la reincorporación de nitrógeno (N) y fósforo (P) (Girisha *et al.* 2003; Ganjegunte *et al.* 2004). Los residuos bajo el piso forestal, producto de las raíces, contribuye con el aumento del carbono (C) orgánico. Una de las propiedades importante relacionadas con el C orgánica es su capacidad de retención de agua (Parfitt *et al.* 2001; Farley *et al.* 2004), siendo beneficioso para el desarrollo de las plantaciones forestales.

#### 3.4.3 Variable dasométrica vs densidad básica

En la Figura 14, se muestra la regresión lineal entre el índice de densidad del rodal (SDI) y la DB de la madera madura. Se observó una tendencia positiva, con el aumento de la DB a medida que aumenta el índice de densidad del rodal.

El Índice de Densidad del Rodal (SDI) fue desarrollado por Reineke (1933). Este índice se basa en el número de árboles por hectárea ( $\text{arb ha}^{-1}$ ) y la interacción entre el diámetro cuadrático medio (DCM) del árbol de área basal promedio y un tamaño del árbol preestablecido (por ejemplo,  $\text{DAP} = 25,4$ ). El SDI define el límite superior de autoaclareo y el punto mínimo de ocupación total del sitio.

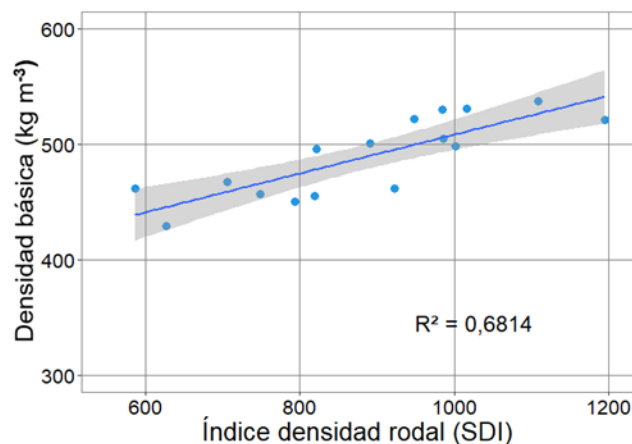


Figura 14. Regresión lineal entre la densidad básica e índice de densidad del rodal (SDI).

La densidad del rodal ( $\text{arb ha}^{-1}$ ) es un factor manipulable que permite regular tanto el crecimiento de los árboles como la calidad de la madera (Carson *et al.*

2014; Schimleck *et al.* 2018). Los árboles cultivados a una mayor densidad de plantación por lo general presentan cambios morfológicos; la copa se ve reducida y alargada, las ramas basales pierden rápidamente la eficiencia fotosintética debido a la escasa luz. A medida que se aleja la copa activa de la base de los árboles, se pierden las características de la madera formada por la copa, la cual estimula la producción de madera temprana (Larson 1969; Amarasekara *et al.* 2002).

### 3.5 Variación del inventario forestal en los diferentes sitios

En la Tabla 1, se entrega la información del inventario forestal realizado en los diferentes sitios muestreados. Los sitios con la menor densidad media del rodal fueron Careo y Caliboro, con 442 y 486 arb ha<sup>-1</sup>, respectivamente, aunque, la DB de la madera madura difirió de 504,7 y 429,2 kg m<sup>-3</sup>, en los sitios mencionados.

Tabla 1. Información del inventario forestal realizado en los diferentes sitios muestreados.

Predio	Densidad del rodal (arb ha <sup>-1</sup> )	Área basa (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	DAP (cm)
El Peral Muñoz	780	34,9	23,9
Macal	748	47,1	28,3
Palhuen	880	40,9	24,3
Los Treiles 1	1.022	37,8	21,7
Los Llanillos	901	47	25,8
El Alamo Libueno	550	45,8	32,9
Los Cajones	615	39,83	28,6
Sn Dionisio	529	30,47	26,3
Caliboro	486	33,81	29,7
Careo	442	69,82	41,9
El Peral FBB	839	49,5	27,4
Sn Juan FBB	531	58,09	37,3
El Rubi	824	54,23	28,4
Malal y Los Morros	1.194	55,1	24,3
Nuevo Mundo	535	59,22	37,4
El Descabezado	1.379	58,4	23,2

Al comparar el área basal en ambos sitios, se observó una amplia variación de 60,8 y 33,8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, mientras que en el DAP también hubo una variación de 41,9 y 29,7 cm. Los sitios difieren en las temperaturas medias, específicamente en las temperaturas máximas del mes más cálido, Careo presentó una temperatura de 23 °C, mientras que el sitio Caliboro se caracterizó por presentar la mayor temperatura, igual a 31 °C. La variación en el DAP y DB entre ambos sitios apoya la hipótesis donde las altas temperaturas durante los meses más cálidos limitan el crecimiento en el período de formación de madera tardía.

### 3.6 Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica

Más allá de la variación natural, las prácticas silvícolas (como el control temprana de la competencia, densidad media del rodal, la poda, el raleo y fertilización) imparten un cambio significativo en la variación de las propiedades de la madera de los árboles. Se abordó la literatura con el objetivo de conocer los efectos de las prácticas silvícolas sobre las propiedades de la madera.

En las prácticas silvícolas de establecimiento se conoce; la densidad media de plantación, fertilización y control de maleza.

#### a) Densidad inicial de plantación



Los efectos de la densidad inicial de plantación han sido estudiados en diversas publicaciones. Lasserre *et al.* (2007) estudió el efecto de la densidad de plantación inicial en un cultivo de semi siembra de *P. radiata* de 11 años de edad. Los rodales fueron establecidos con densidades de 833 a 2.500 arb ha<sup>-1</sup>. Aunque la investigación de Lasserre *et al.* (2007) no demostró diferencias significativas sobre la DB de la madera, se observó un aumento en la rigidez de la madera, además, el aumento de la densidad de plantación redujo el diámetro en los anillos de crecimiento con aumento en el porcentaje de madera tardía. En cambio, el amplió espaciamiento entre árboles favorece el crecimiento temprano del diámetro y produce un mayor tamaño de la copa activa con ramas de mayor diámetro (Cown *et al.* 1992). Desde la perspectiva del manejo forestal, el rápido crecimiento en etapas tempranas y, la reducción en la rotación de las plantaciones, ha puesto en énfasis una alta proporción de madera del núcleo (o juvenil). Además, los árboles con un mayor diámetro de las ramas (o nudos) son de poco interés en la producción de madera aserrada estructural en los mercados de Nueva Zelanda (Alzamora *et al.* 2013).

#### b) Control de competencia

En general, el control de maleza o competencia temprana aumentan sustancialmente el diámetro de los árboles, sin embargo, el conocimiento sobre los efectos de estas prácticas silvícolas en la calidad de la madera es limitado. Por ejemplo, Watt *et al.* (2005) compararon el crecimiento de *P. radiata* cultivados

en presencia y ausencia de *Cystisus scoparius* L. (escoba leñosa), una especie arbustiva de 1 o 2 metros de altura, se evaluó los cambios en las propiedades de la madera en los primeros 2 años de crecimiento. La presencia de la maleza aumentó significativamente el MOE, el grosor de la pared celular y la densidad media de la madera (8%), y se mostró una reducción en el ángulo de la microfibrilla y diámetro radial. Eberhardt *et al.* (2022) evaluaron el control de maleza, riego y fertilización sobre el crecimiento de *Pinus taeda* L. Se evidenció que los tratamiento control de maleza y el tratamiento control de maleza más riego obtuvieron valores similares en el diámetro de los anillos de crecimiento y densidad media de la madera. Sin embargo, la combinación de los tres tratamiento aumento significativamente el diámetro de los anillos de crecimiento, pero con reducción en la densidad media de la madera.

### c) Fertilización

La fertilización, dependiendo de los nutrientes aplicados y la concentración de los elementos, tiene un fuerte impacto sobre las propiedades de la madera. Beets *et al.* (2001) estudiaron el efecto del aporte de nitrógeno en cultivos de *P. radiata*, y se demostró una respuesta positiva en el tamaño de la copa activa y en la concentración de N en las hojas, con aumento en el diámetro de los árboles, sin embargo, el porcentaje de madera tardía fue significativamente menor en los rodales fertilizados en comparación con los no fertilizados. Por otro lado, Nyakuengama *et al.* (2002) evaluaron el efectos de la fertilización con nitrógeno

y fósforo. La combinación de ambos nutrientes indujo una mayor reducción en la densidad básica en comparación con la aplicación de los fertilizantes por separados. Los efectos pueden expresarse durante un período máximo de 5 años.

En las practicas silvícolas intermedias se conoce; fertilización, aclareos y poda.

Si bien, la fertilización induce una reducción en la densidad básica de la madera, otro factor a considerar está ligado con la etapa de desarrollo de la plantación, ya que los efectos son más marcados en etapas tempranas de crecimiento que en etapas adulta (Roque *et al.* 2003). Sin embargo, la fertilización en conjunto con el raleo induce una mayor reducción en la densidad básica, MOE y módulo de ruptura (Downes *et al.* 2002).

#### d) Raleo

El raleo o adelgazamiento del rodal consiste en la extracción o corta de los árboles de poco interés desde el punto de vista silvícola y/o producto de algún daño. Sus efectos sobre el crecimiento son conocidos y, se atribuye a un aumento en el crecimiento radial, aunque se conoce poco sobre su efecto en la calidad de la madera. Watt *et al.* (2011) evaluaron los efecto de la densidad del rodal en un cultivo de semi siembra de *P. radiata*, con densidad inicial de 1.667 arb ha<sup>-1</sup>, los cuales, a los 5 años se realizó una reducción en la densidad del rodal, alcanzando cuatro niveles de densidad final, igual a, 1.100, 500, 350 y 200 arb ha<sup>-1</sup>. La DB

presentó diferencias de 580 a 488 kg m<sup>-3</sup>, siendo los valores más altos en el cultivo más denso (arb ha<sup>-1</sup>). Además, se observó un variación sobre la rigidez, variando de 17,2 a 12,1 GPa.

#### e) Poda

La poda consiste en la eliminación de las ramas basales con el objetivo de producir madera libre de nudos. La investigación realizada por Carson *et al.* (2014), señalan que la poda, al igual que la densidad media del rodal, induce un efecto positivo sobre la densidad básica de la madera. Según el estudio realizado por Gartner *et al.* (2002) en *Pseudotsuga menziesii* [Mirb.], cultivados en la costa de Oregón, se llevó a cabo intervenciones de poda a los 13 y 18 años, con una intensidad de 30 y 50% de la copa, respectivamente. La poda con una intensidad del 50% redujo sustancialmente el ancho del anillo de crecimiento, lo que siguió con el aumento del porcentaje de madera tardía. Concluyeron que la poda influye en la transición de la madera juvenil a madera madura. Larson (1969) explica que la madera del tallo se encuentra principalmente regulada por el crecimiento y desarrollo de los órganos foliares de la copa de los árboles, teniendo efecto directo sobre el ancho del anillo y la densidad de la madera. Se deduce que la eliminación de las ramas de la copa activa reduce la concentración de auxinas liberadas por las yemas apicales, afectando la formación de madera temprana.

#### IV. CONCLUSIONES

La densidad básica de la madera sigue el patrón descrito en diversas publicaciones con aumento progresivo desde la médula hasta la corteza, siendo la madera madura la de mayor densidad básica.

La madera de transición y madera madura presentaron diferencias locales en densidad básica entre sitios, con valores bajos en la zona del valle central en la Región del Maule, y valores altos en la cordillera de la costa exposición oeste en la Región Biobío.

El rendimiento estructural entre sitios difirió de 12 (Los Treiles 1) a 25 % (Careo) en los sitios muestreados.

Al considerar la matriz de correlación, se demostró una fuerte relación entre la DB de la madera de transición y madera madura con las variables climáticas, suelo y dasométrica. En cuanto a las regresiones lineales, las variables de temperatura mostraron mayor relación con la DB, específicamente el rango medio mensual temperatura máxima y mínima, temperatura máxima del mes más cálido (°C) y la temperatura media anual (°C). Por otro lado, el porcentaje de materia orgánica y el índice de densidad del rodal son factores por considerar si se quiere aumentar la densidad básica de la madera en los rodales.

El adecuado manejo de la densidad del rodal ( $\text{arb ha}^{-1}$ ) permite regular el crecimiento de los árboles y la calidad de la madera.

## **GLOSARIO**

## V. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado A., J. Zabaleta. 2010. El cambio climático en el sector silvoagropecuario de Chile.
- Alvarez V., P. Poblete. 2020. Exportaciones Forestales Enero-Diciembre 2019.
- Alzamora R.M., L.A. Apiolaza. 2013. A DEA approach to assess the efficiency of radiata pine logs to produce New Zealand structural grades. *Journal of Forest Economics* 19(3): 221-233.
- Amarasekara H., M. Denne. 2002. Effects of crown size on wood characteristics of Corsican pine in relation to definitions of juvenile wood, crown formed wood and core wood. *Forestry* 75(1): 51-61.
- Barrios A., G. Trincado, M.S. Watt. 2016. Wood properties of juvenile and mature wood of *Pinus radiata* D. Don trees growing on contrasting sites in Chile. *Forest Science* 63(2): 184-191.
- Beets P., K. Gilchrist, M. Jeffreys. 2001. Wood density of radiata pine: effect of nitrogen supply. *Forest Ecology and Management* 145(3): 173-180.
- Beets P., M. Kimberley, R. McKinley. 2007. Predicting wood density of *Pinus radiata* annual growth increments. *New Zealand Journal of Forestry Science* 37(2): 241.
- Büchner C., M. Martin Stuenkel, R. Sagardía Parga, A. Avila Campos, E. Molina Rademacher, J.C. Muñoz Baeza, *et al.* 2018. Disponibilidad de madera de plantaciones de Pino radiata y Eucalipto (2017-2047).



- Carril E.P.-U. 2011. Fotosíntesis: aspectos básicos. Reduca (Biología) 2(3).
- Carson S.D., D.J. Cown, R.B. McKinley, J.R. Moore. 2014. Effects of site, silviculture and seedlot on wood density and estimated wood stiffness in radiata pine at mid-rotation. New Zealand Journal of Forestry Science 44: 1-12.
- Chauhan S., J. Walker. 2006. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. Forest Ecology and Management 229(1-3): 388-394.
- Cown D., R. Ball. 2001. Wood densitometry of 10 *Pinus radiata* families at seven contrasting sites: influence of tree age, site, and genotype. New Zealand Journal of Forestry Science 31(1): 88-100.
- Cown D., G. Young, R. Burdon. 1992. Variation in wood characteristics of 20-year-old half-sib families of *Pinus radiata*. New Zealand Journal of Forestry Science 22(1): 63-76.
- Dias A., M.J. Gaspar, A. Carvalho, J. Pires, J. Lima-Brito, M.E. Silva, *et al.* 2018. Within-and between-tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. Annals of forest science 75: 1-19.
- Downes G.M., J.G. Nyakuengama, R. Evans, R. Northway, P. Blakemore, R.L. Dickson, *et al.* 2002. Relationship between wood density, microfibril angle and stiffness in thinned and fertilized *Pinus radiata*. IAWA journal 23(3): 253-265.
- Eberhardt T.L., D.J. Leduc, L.J. Samuelson. 2022. Wood properties of loblolly pine grown under intensive management in the Upper Coastal Plain of southwest Georgia. Canadian Journal of Forest Research 52(7): 1110-1118.

- Farley K.A., E.F. Kelly, R.G. Hofstede. 2004. Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems* 7: 729-739.
- Flores F.J., H. Allen. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque (Valdivia)* 25(3): 11-24.
- Ganjegunte G.K., L.M. Condrón, P.W. Clinton, M.R. Davis, N. Mahieu. 2004. Decomposition and nutrient release from radiata pine (*Pinus radiata*) coarse woody debris. *Forest Ecology and Management* 187(2-3): 197-211.
- Gartner B.L., E.M. North, G. Johnson, R. Singleton. 2002. Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 32(3): 439-447.
- Gerding V., J.E. Schlatter. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16(2): 39-56.
- Girisha G., L. Condrón, P. Clinton, M. Davis. 2003. Decomposition and nutrient dynamics of green and freshly fallen radiata pine (*Pinus radiata*) needles. *Forest Ecology and Management* 179(1-3): 169-181.
- Gysling J., S. Aguirre, D. Infor. 2006. *Industria forestal primaria en Chile. Período 2015.*
- Gysling J., C. Kahler, D. Soto, V. Álvarez González, V. Pardo, P. Poblete Hernández, *et al.* 2020. El mercado de la madera aserrada para uso estructural en Chile.
- Gysling J., C. Kahler, D. Soto, W. Mejías Caballero, P. Poblete Hernández, V. Álvarez González, *et al.* 2021. Madera y construcción. Hacia una simbiosis estratégica.

- Hislop A., H. Palmer, B. Gardiner. 1999. Assessing woodland shelter on farms. *Farm Woodland for the Future*: 31-43.
- Ivković M., W. Gapare, H. Wu, S. Espinoza, P. Rozenberg. 2013. Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Annals of forest science* 70(5): 525-534.
- Kibblewhite R.P., K. Hamilton. 1984. Fibre cross-section dimensions of undried and dried *Pinus radiata* kraft pulps.
- Larson P.R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality.
- Larson P.R. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p.
- Lasserre J.-P., E.G. Mason, M.S. Watt. 2007. Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-year-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. *Forest Ecology and Management* 239(1-3): 217-221.
- Lebourgeois F. 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of forest science* 57(2): 155-164.
- Louzada J.L.P. 2003. Genetic correlations between wood density components in *Pinus pinaster* Ait. *Annals of forest science* 60(3): 285-294.
- 
- Mead D.J. 2013. Sustainable management of *Pinus radiata* plantations. Food and agriculture organization of the United nations (FAO). p.

- Nyakuengama J.G., G.M. Downes, J. Ng. 2002. Growth and wood density responses to later-age fertilizer application in *Pinus radiata*. IAWA journal 23(4): 431-448.
- Palmer D.J., M.O. Kimberley, D.J. Cown, R.B. McKinley. 2013. Assessing prediction accuracy in a regression kriging surface of *Pinus radiata* outerwood density across New Zealand. Forest Ecology and Management 308: 9-16.
- Parfitt R., G. Salt, S. Saggart. 2001. Post-harvest residue decomposition and nitrogen dynamics in *Pinus radiata* plantations of different N status. Forest Ecology and Management 154(1-2): 55-67.
- Reineke L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests.
- Roco L., A. Engler, B.E. Bravo-Ureta, R. Jara-Rojas. 2015. Farmers' perception of climate change in mediterranean Chile. Regional environmental change 15: 867-879.
- Roque R.M., L. Valenzuela, F. Salazar. 2003. Efecto de la fertilización a la pradera sobre la delimitación y características del período juvenil de *Pinus radiata* D. Don. Invest Agrar: Sist Recur For 12(2): 13-23.
- Schimleck L., F. Antony, J. Dahlen, J. Moore. 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.
- Soto Aguirre D., J. Gysling Caselli, C. Kahler González, P. Poblete Hernández, V. Alvarez González, E. Pardo Velásquez, *et al.* 2021. Anuario Forestal 2021.
- Suirezs T., G. Berger. 2009. Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Cuadernos de Cátedra Editorial Universitaria de Misiones.

- Thompson W., A. Wheeler. 1992. Photosynthesis by mature needles of field-grown *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 52(1-4): 225-242.
- Vásquez V., M. Elgueta, C. Hernández, P. Campos, L. Catalán, C. Reyes Riquelme, *et al.* 2019. Alternativas para la clasificación mecánica de madera aserrada estructural.
- Waghorn M.J., D. Whitehead, M.S. Watt, E.G. Mason, J.J. Harrington. 2015. Growth, biomass, leaf area and water-use efficiency of juvenile *Pinus radiata* in response to water deficits. *New Zealand Journal of Forestry Science* 45: 1-11.
- Watt M.S., G.M. Downes, D. Whitehead, E.G. Mason, B. Richardson, J.C. Grace, *et al.* 2005. Wood properties of juvenile *Pinus radiata* growing in the presence and absence of competing understorey vegetation at a dryland site. *Trees* 19: 580-586.
- Watt M.S., G. Trincado. 2019. Modelling the influence of environment on basic density of the juvenile wood for *Pinus radiata* grown in Chile. *Forest Ecology and Management* 448: 112-118.
- Watt M.S., B. Zoric, M.O. Kimberley, J. Harrington. 2011. Influence of stocking on radial and longitudinal variation in modulus of elasticity, microfibril angle, and density in a 24-year-old *Pinus radiata* thinning trial. *Canadian Journal of Forest Research* 41(7): 1422-1431.
- Zamudio F., R. Baettyg, A. Vergara, F. Guerra, P. Rozenberg. 2002. Genetic trends in wood density and radial growth with cambial age in a radiata pine progeny test. *Annals of forest science* 59(5-6): 541-549.

## VI. APÉNDICE

Apéndice 1. Característica climática, suelo y dasométrica de cada sitio, según la procedencia de las muestras de madera.

Predio	Latitud	Temperatura media anual (°C)*	Rango medio mensual T. Máx. y mín.	Precipitación media anual (mm)	Materia orgánica (%)	Índice de densidad rodal (SDI)
El Peral Muñoz	34° 43"	13,6 (25 – 5)	11,5	582	2,6	706
Macal	35° 10"	13,9 (25 – 5)	10,5	713	3,2	890
Palhuen	35° 14"	13,8 (28 – 4)	12,1	657	2,4	821
Los Treiles 1	35° 15"	12,9 (27 – 3)	12,5	689	2,9	794
Los Llanillos	35° 15"	12,2 (27 – 2)	13	726	4,5	922
El Alamo Libueno	35° 27"	14,7 (30 – 3)	13,7	947	2,1	819
Los Cajones	35° 40"	13,6 (31 – 3)	14,2	731	3,6	749
Sn. Dionisio	35° 44"	13,5 (29 – 3)	13,5	1.438	5,1	586

Caliboro	35° 48"	14,4 (31 – 3)	14,1	666	1,6	627
Careo	36° 04"	12,4 (23 – 5)	9,3	878	5,2	986
El Peral FBB	36° 32"	12,4 (24 – 5)	9,5	971	4,6	948
Sn. Juan FBB	36° 37"	12,4 (23 – 5)	8,7	1.119	5,2	985
El Rubi	37° 09"	11,5 (23 – 3)	9,7	1.439	6,6	1.016
Malal y Los Morros	37° 12"	11,4 (23 – 3)	9,7	1.426	8,2	1.108
Nuevo Mundo	37° 24"	11,8 (24 – 4)	10,1	1.984	6,4	1.001
El Descabe zado	37° 31"	11,9 (23 – 5)	8,9	1.774	7,3	1.194

\*En paréntesis se denota el rango máximo y mínimo.

Apéndice 2. Variación de densidad básica en las diferentes muestras de madera.

Muestra	Media	Desv. Estándar	Coef. Variación	Máximo	Mínimo	n total
Madera Juvenil	401,5	26,2	6,5	462,9	356,2	133
Madera Transición	457,7	49,5	10,8	583,3	353,2	129
Madera Madura	493,1	47,1	9,6	603,5	402,8	85
DB al DAP	447,6	35,7	8	532,6	369,4	85

Apéndice 3. Variación de densidad básica a nivel de sitio, en las diferentes muestras de madera.

Predio	Parámetro	Madera Juvenil	Madera Transición	Madera Madura	DB media al DAP
El Peral	$\bar{X}$	394,1	419,3	467,4	424,4
Muñoz	(DE)	22,6	31,2	20,0	20,8
	(CV)	5,7	7,4	4,3	4,9
	n	9	9	6	6
Macal	$\bar{X}$	409,7	457,9	500,9	450,9
	(DE)	20,1	42,0	24,7	15,8



	(CV)	4,9	9,2	4,9	3,5
	n	9	9	7	7
Palhuen	$\bar{X}$	420,9	441,7	495,7	453,0
	(DE)	28,5	43,2	51,1	37,7
	(CV)	6,8	9,8	10,3	8,3
	n	9	9	7	7
Los Treiles 1	$\bar{X}$	410,7	425,9	450,7	422,0
	(DE)	29,0	23,7	27,7	20,2
	(CV)	7,1	5,6	6,1	4,8
	n	9	7	5	5
Los Llanillos	$\bar{X}$	387,9	445,0	461,8	426,1
	(DE)	18,3	33,2	41,6	15,0
	(CV)	4,7	7,5	9,0	3,5
	n	9	8	2	2
El Alamo Libueno	$\bar{X}$	381,9	426,0	455,5	420,0
	(DE)	21,3	38,5	37,9	26,2
	(CV)	5,6	9,0	8,3	6,2
	n	8	8	6	6
Los Cajones	$\bar{X}$	408,7	422,1	456,6	422,9
	(DE)	13,4	42,0	19,6	1,6
	(CV)	3,3	10,0	4,3	0,4

	n	8	8	3	3
Sn Dionisio	$\bar{X}$	383,5	426,6	461,6	416,2
	(DE)	21,2	33,7	35,7	30,8
	(CV)	5,5	7,9	7,7	7,4
	n	9	8	5	5
Caliboro	$\bar{X}$	377,1	393,4	429,2	398,0
	(DE)	14,2	21,2	20,8	16,9
	(CV)	3,8	5,4	4,8	3,1
	n	8	8	6	6
Careo	$\bar{X}$	414,7	500,4	504,7	477,3
	(DE)	37,0	27,4	63,4	15,0
	(CV)	8,9	5,5	12,6	3,1
	n	5	5	2	2
El Peral FBB	$\bar{X}$	403,1	512,1	522,1	473,2
	(DE)	24,0	27,6	55,9	29,3
	(CV)	6,0	5,4	10,7	6,2
	n	8	8	7	7
Sn Juan FBB	$\bar{X}$	423,7	501,1	530,2	483,5
	(DE)	29,8	40,8	35,1	31,3
	(CV)	7,0	8,1	6,6	6,5
	n	9	9	9	9

El Rubi	$\bar{X}$	408,8	501,4	531,0	471,4
	(DE)	20,7	28,7	26,5	23,1
	(CV)	5,1	5,7	5,0	4,9
	n	9	9	7	7
Malal y Los Morros	$\bar{X}$	416,1	489,2	537,4	480,4
	(DE)	19,7	48,5	25,0	16,4
	(CV)	4,7	9,9	4,7	3,4
	n	8	8	5	5
Mundo Nuevo	$\bar{X}$	389,6	455,7	498,7	429,3
	(DE)	19,8	19,1	1,8	11,1
	(CV)	5,1	4,2	0,4	2,6
	n	7	7	2	2
El Descabezado	$\bar{X}$	394,9	507,0	521,6	461,9
	(DE)	27,1	24,3	32,6	28,5
	(CV)	6,9	4,8	6,3	6,2
	n	9	9	6	6

$\bar{X}$  : Media aritmética.

(DE) : Desviación estándar.

(DE) : Desviación estándar.

n : Número de probetas.

Apéndice 4. Coeficientes de correlación entre las variables climáticas, suelo y dasométrica, y las medias de densidad básica al DAP, madera juvenil, madera transición y madera madura.

Variable	Madera Juvenil	Madera Transición	Madera Madura	DB media al DAP
Rango medio mensual T. máx. y mín.	-0,5242	-0,9093	-0,9174	-0,8750
Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	-0,5011	-0,8811	-0,8849	-0,8383
Temperatura media anual (°C)	-0,3478	-0,7642	-0,7287	-0,6498
Temperatura mínimo del mes más frío (°C)	0,3919	0,5054	0,5382	0,5636
Precipitación media anual (mm)	-0,1262	0,4796	0,5203	0,2851

Materia orgánica (%)	0,2384	0,7438	0,7532	0,6281
Índice de densidad de rodal (SDI)	0,4096	0,8531	0,8255	0,7715