



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Efecto de regímenes de raleos sobre el rendimiento y crecimiento de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en un sitio de alta productividad

Patrocinante: Sr. Guillermo Trincado V.

Trabajo de Tesina presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero Forestal**

LEANDRO ANDRÉS CHAURA MANCILLA

VALDIVIA

2025

Índice de materias

Página

| i. | Calificación del Comité de Titulación | i |
|--------|---|-----|
| ii. | Agradecimientos | ii |
| iii. | Dedicatoria | iii |
| iv. | Resumen | iv |
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | ESTADO DEL ARTE | 3 |
| 3. | MÉTODOS | 8 |
| 3.1. | Ensayo de manejo silvícola Nihuinco | 8 |
| 3.2. | Diseño experimental | 8 |
| 3.3. | Estimación de parámetros de rodal | 12 |
| 3.4. | Cálculo de tasas de crecimiento acumulado | 13 |
| 3.5. | Análisis estadístico | 13 |
| 4. | RESULTADOS | 15 |
| 4.1. | Efecto del raleo a desecho | 15 |
| 4.1.1. | Comparación de rendimientos | 15 |
| 4.1.2. | Comparación de la distribución diamétrica | 17 |
| 4.1.3. | Comparación de volúmenes de productos | 18 |
| 4.2. | Efecto de la intensidad del primer raleo comercial | 19 |
| 4.2.1. | Comparación del crecimiento acumulado | 19 |
| 4.2.2. | Comparación del incremento periódico anual | 21 |
| 4.3. | Efecto de la intensidad del segundo raleo comercial | 23 |
| 4.3.1. | Comparación del crecimiento acumulado | 23 |
| 4.3.2. | Comparación del incremento periódico anual | 26 |
| 5. | DISCUSIÓN | 29 |
| 5.1. | Efecto del raleo a desecho sobre el rendimiento | 29 |
| 5.2. | Efecto del raleo a desecho sobre la distribución diamétrica y volumen de productos | 30 |
| 5.3. | Efecto de la intensidad del primer raleo comercial sobre el crecimiento a nivel de rodal | 31 |
| 5.4. | Efecto de la intensidad del segundo raleo comercial sobre el crecimiento a nivel de rodal | 33 |
| 6. | CONCLUSIONES | 35 |
| 7. | REFERENCIAS | 36 |
| Anexos | 1. Diseño de tratamientos del ensayo Nihuinco | 41 |
| | 2. Rendimiento observado post intervención para el primer y segundo raleo comercial | 42 |
| | 3. Comparaciones múltiples del incremento periódico anual post-intervención | 43 |

Calificación del Comité de Titulación

| | Nota |
|--|-------------|
| Patrocinante: Sr. Guillermo Trincado Villagrán | <u>6,5</u> |
| Informante: Sr. Jean Pierre Lasserre Sagardía | <u>6,4</u> |
| Informante: Sr. Óscar Thiers Espinoza | <u>7,0</u> |

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Guillermo Trincado V.

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo y confianza incondicional brindado estos años fuera de casa, y sobre todo por entregarme los valores que me han formado como persona.

A mi profesor patrocinante Sr. Guillermo Trincado V. por compartir su experiencia, apoyo, tiempo y sugerencias que me permitieron desarrollar y culminar este trabajo.

A Cristian Higuera del Modelo Nacional de Simulación por su apoyo con la base de información utilizada en este trabajo, aportada por Forestal Mininco.

A Jean Pierre Lasserre S. y Óscar Thiers E. por ser parte de mi comisión evaluadora.

A los amigos que formé en esta etapa, Karol Guitard, Gabriel Garín, Natalia Vidal, María José Gatica, Valentina Rojas, Cristóbal Guevara, Cristóbal Bustamente, Rayen Neira, Danko Inzuza, Oscar Tuero, Benjamín Soto y Vicente Navia, que sin duda hicieron este proceso mucho más enriquecedor.

Y a mis amigos de siempre por abrirme las puertas de sus casas cuando lo necesité: Diego (Yeyo), Gonzalo (Xulo), Vicente (Xente) y Fabián (Xego).

A mis padres...

"Parto del principio de que la reflexión debe preceder a la acción, bobalina"

Julio Cortázar

Resumen

El presente estudio evaluó el efecto de diversos regímenes de raleo sobre el rendimiento y crecimiento a nivel de rodal, ejecutados a la edad de 4, 7 y 12 años en una plantación de *P. radiata* establecida en un sitio de alta productividad. La información necesaria se obtuvo de mediciones anuales del ensayo de manejo silvícola “Nihuinco” instalado por Forestal Mininco. El diseño experimental del ensayo corresponde a bloques al azar con 3 repeticiones por tratamiento. Los parámetros de rodal evaluados fueron el área basal (G), diámetro medio cuadrático (DMC), altura dominante (H_{100}), volumen total (VT) y comercial (VC), volúmenes a nivel de productos y la distribución diamétrica. Para la comparación de tratamientos se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Duncan y para la comparación de distribuciones diamétricas la prueba Kolmogorov-Smirnov. A la edad de 18 años el tratamiento que consideró la aplicación de RD a una densidad remanente de 700 arb ha^{-1} no presentó diferencias significativas de rendimiento en G, VT y VC respecto al testigo. Sin embargo, se observaron diferencias significativas en el DMC. Igualmente, presentó una mayor proporción de individuos en clases diamétricas superiores acumulando significativamente un mayor volumen aserrable en comparación al testigo. La aplicación de un RC1 considerando densidades residuales de 700 y 400 arb ha^{-1} aumentó significativamente las tasas de incremento periódico anual de G y DMC en comparación al testigo. La aplicación de un RC2 con densidades residuales de 500 , 400 y 300 arb ha^{-1} también aumentó significativamente el incremento periódico anual en G y DMC respecto al testigo. La intensidad en ambas oportunidades aumentó significativamente el incremento en DMC. Sin embargo, con mayores intensidades el crecimiento en VT disminuyó en RC1 y no tuvo un efecto en RC2 respecto al testigo. La oportunidad y la intensidad de los regímenes de raleo evaluados no afectó el rendimiento y las tasas de crecimiento de la H_{100} .

Palabras claves: ensayo silvícola, plantaciones forestales, raleo, intensidad, oportunidad.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile las plantaciones forestales se estima que cubren una superficie total de 3,1 millones de hectáreas contribuyendo con un 1,6 % del PIB¹ nacional (Poblete *et al.* 2023). Dentro de estas plantaciones la especie de mayor interés comercial es *Pinus radiata* (D. Don). Las cuales se han establecido desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Lagos en diversas condiciones de sitios que incluyen una amplia variación espacial de tipos de suelos, temperatura y precipitación anual, que producen a su vez una alta variabilidad en la productividad y calidad de la madera (CONAF 2023).

Para la producción maderera se aplican principalmente tres tipos de regímenes de manejo silvicultural: *intensivo*, *extensivo* y *pulpable* que son asignados entre los 3-5 años de acuerdo con la productividad del sitio medida operacionalmente en términos del índice de sitio (IS). En términos generales, el *manejo intensivo* está orientado a sitios de alta productividad ($IS \geq 28$ m) y tiene como objetivo producir madera libre de nudos de alto valor. Este régimen de manejo silvícola considera intervenciones conjuntas de raleos y podas. Las podas se ejecutan a edades de entre los 5 y 7 años considerando 2-3 levantes hasta alcanzar una altura de poda de 5,8 m; considerando dos raleos para alcanzar una densidad final entre 400-500 arb ha⁻¹. Por otro lado, el *manejo extensivo* ($24 \text{ m} \leq IS < 28$ m) está orientado a la producción de madera aserrada nudosa para usos estructurales considerando la ejecución de un único raleo comercial a los 7 años reduciendo la densidad a 650 arb ha⁻¹. Por último, el *manejo pulpable* asignado a sitios de baja productividad ($IS < 24$ m) está orientado para la producción de madera pulpable y aserrables de bajos diámetros y normalmente no se consideran intervenciones de raleos ni podas (Gerding 1991, Ipinza 2010).

La ejecución de raleos tiene como principal objetivo aumentar las tasas de crecimiento de los árboles remanentes permitiendo así alcanzar dimensiones industriales a una edad más temprana, como también mejorar la calidad y sanidad del rodal residual. En plantaciones comerciales se aplican dos tipos de raleos que permiten reducir densidad pero que se diferencian en el aprovechamiento de la madera. El *raleo a desecho* (RD) se ejecuta a edades tempranas entre los 4-6 años y no se realiza ningún aprovechamiento de los árboles raleados debido a que no alcanzan dimensiones comerciales. Contrariamente, los *raleos comerciales* (RC) en el ámbito operacional se realizan entre los 7-12 años. Por otro lado, la intervención de poda consiste en la remoción de ramas vivas que se encuentran en el fuste del árbol y que permite

¹ El producto interno bruto (PIB) mide el valor de todos los bienes y servicios producidos en una economía (Mankiw 2012).

para el caso de *P. radiata* la formación de madera libre de nudos. La ejecución de este tipo de intervención también requiere definir su intensidad y oportunidad. La primera está determinada por la proporción de copa verde extraída y la segunda suele estar determinada por la edad.

A pesar de la experiencia en Chile respecto al manejo de las plantaciones de *P. radiata*, son escasos los estudios reportados que cuantifican el efecto de los regímenes de raleos sobre el crecimiento y rendimiento a nivel de rodal y árbol individual. Por ello, el objetivo general de este trabajo es evaluar el efecto de diversos tipos de regímenes de raleo sobre el rendimiento y crecimiento de una plantación de *P. radiata* (D. Don) localizada en un sitio de alta productividad. Esta plantación representa el manejo de establecimiento intensivo aplicado a las nuevas poblaciones que considera material genético mejorado y nuevas técnicas de establecimiento que incluyen control de malezas, preparación de suelo y fertilización. Para este estudio se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- i) Cuantificar el efecto de raleo a desecho sobre el comportamiento de parámetros a nivel de rodal, distribución diamétrica y volúmenes de productos respecto al testigo
- ii) Cuantificar el efecto de la intensidad de un primer raleo comercial (RC1) sobre las tasas de crecimiento de parámetros a nivel de rodal respecto al testigo.
- iii) Cuantificar el efecto de la intensidad de un segundo raleo comercial (RC2) sobre las tasas de crecimiento de parámetros a nivel de rodal respecto al testigo.

La evaluación del efecto de diversos regímenes de raleos (y podas) requiere necesariamente de la instalación de ensayos de manejo de largo plazo con mediciones anuales. Lo que permite sobre todo la validación de los modelos de simulación existentes.

2. ESTADO DEL ARTE

Con el propósito de entender el efecto del raleo sobre el rendimiento y el crecimiento en los diferentes análisis se describen las condiciones de desarrollo donde se encuentran las plantaciones de *P. radiata* en Chile. Además de su importancia industrial que justifica el desarrollo de investigación para la correcta definición de esquemas de manejo silvícola bajo diversas condiciones de productividad. También, se detallan los efectos de los raleos reportados tanto a nivel de rodal como de árbol individual principalmente en plantaciones de *P. radiata*.

Las plantaciones de *P. radiata* cubren una superficie de 1,8 millones de hectáreas que corresponden al 58 % de las plantaciones forestales del país (Poblete *et al.* 2023). Estas se encuentran distribuidas desde la región de Valparaíso hasta Los Lagos, concentrándose el 58 % entre las regiones del Maule y el Biobío (CONAF 2023). Diversos estudios indican que las mejores condiciones de crecimiento para esta especie se encuentran en sitios con precipitaciones anuales sobre los 1000 mm, con temperaturas medias anuales sobre los 12 °C y temperaturas máximas entre 22 y 28 °C (Schlatter y Gerding 1995, Álvarez *et al.* 2013). La mayor productividad se ha reportado en suelos con un origen de cenizas volcánicas recientes o sedimentos marinos, debido a su mayor profundidad, buena aireación, y altos niveles de capacidad de agua aprovechable, componentes favorecidos por la textura franco arcillo limosa o franco arcillosas que suelen presentar (Schlatter y Gerding 1995). Por otro lado, los factores que limitan la productividad de esta especie en Chile son la disponibilidad de agua durante el período de crecimiento, lo cual está determinado por la distribución de la precipitación a lo largo del año, el contenido de humedad que logran retener los suelos y la evapotranspiración potencial (Álvarez *et al.* 2013).

Para esta especie la tasa de plantación anual (forestación y reforestación) durante el período 2023-2024 fue de 47.830 ha año⁻¹ (CONAF 2024). Durante el año 2022 esta especie fue la principal fuente de materia prima, donde se consumieron 28 millones de m³ssc de trozas para la elaboración de productos forestales que representa el 70 % del consumo total. Las plantaciones de *P. radiata* aportaron con un 54 % de la producción de pulpa química, 98 % de la producción de madera aserrada y un 87 % de la producción de tableros y chapas (Poblete *et al.* 2023).

Los bosques naturales sin manejo silvícola pueden alcanzar altos niveles de rendimiento acumulado. Sin embargo, este rendimiento puede ser considerado ineficiente ya que esa biomasa está distribuida en un gran número de individuos de pequeñas dimensiones (Curtis 1970). En este tipo de bosques existe una importante variabilidad respecto a la calidad de los árboles, lo que no asegura obtener productos finales de alto valor y además presentan una alta mortalidad, biomasa que no es aprovechada (Shepherd

1986, Cristina 2020). Contrariamente, la aplicación de regímenes de manejo silvícola permite una mayor acumulación de volumen aprovechable distribuido en una menor cantidad de individuos que son superiores en tamaño, calidad y valor (Forrest 1983). Para el caso de las plantaciones de *P. radiata* las principales herramientas silvícolas son la aplicación de raleos y podas. El primero se define como una reducción de la densidad arbórea, controlando así la densidad, estructura y composición de especies de interés comercial y tiene como propósito aumentar el crecimiento y productividad de los árboles remanentes (Shepherd 1986, Cristina 2020). En el caso de la poda, esta consiste en la remoción de ramas vivas del fuste del árbol hasta alcanzar entre 5 a 6 metros libre de ramas y tiene como objetivo la producción de madera libre de nudos (Mead 2013).

Con el propósito de maximizar tanto el rendimiento como el valor económico del bosque la ejecución de un raleo requiere determinar el tipo, la intensidad y la oportunidad. El *tipo de raleo* consiste en definir la forma en que será intervenido el rodal en relación con la distribución de tamaños de los árboles. La *intensidad* puede ser medido respecto a la proporción extraída tanto de árboles, área basal como de volumen total, y la *oportunidad* respecto a la edad de ejecución de la intervención.

Entre los tipos de raleos más comunes se encuentran el *raleo por lo bajo*, donde se extraen individuos que se encuentran en clases diamétricas inferiores y corresponde al método más aplicado en plantaciones forestales de Pino radiata, considerando criterios de forma y espaciamiento; en segundo lugar, un *raleo por lo alto* extrae individuos de las clases diamétricas superiores y un *raleo sistemático* extrae individuos en todas las clases diamétricas (Shepherd 1986). También existen otros tipos de raleo como el *raleo de selección* y el *raleo libre*. En el primer caso sólo se extraen individuos de grandes dimensiones, normalmente sobre un diámetro límite. Por su parte, el *raleo libre* corresponde a una combinación de los demás *tipos de raleos* mencionados. Por otro lado, la *intensidad* de un raleo debe ser seleccionada de manera correcta. Una alta intensidad de raleo puede subutilizar la capacidad productiva del sitio lo que implica una pérdida en la rentabilidad final. A pesar de favorecer el desarrollo de árboles de mayor tamaño y valor, esto no permite suplir la pérdida de valor por una menor cantidad de árboles en comparación con una menor intensidad de raleo (del Río *et al.* 2017). Contrariamente, cuando la intensidad del raleo es muy baja el efecto sobre el crecimiento de los árboles puede ser despreciable. Por lo tanto, ocurre algo semejante a rodales sin manejo, donde se produce una mayor proporción de productos de menor calidad y valor. (Forrest 1973, Rodríguez *et al.* 2002). Y por último, dependiendo de la *oportunidad* de la ejecución de los raleos estos se pueden clasificar en *raleos a desecho* (o *pre-comerciales*) y *raleos comerciales*. Un *raleo a desecho* se realiza a una edad en la que el rodal aún se mantiene inmaduro y no es posible extraer productos forestales. En este caso, el propósito es aumentar

el crecimiento de los árboles remanentes para que alcancen mayores tamaños en un menor período de tiempo, disminuyendo la edad de rotación (Bayar y Deligoz 2020). Por su parte, los *raleos comerciales* se realizan a edades mayores, lo que permite la obtención de productos madereros favoreciendo también el crecimiento de los árboles remanentes. En general, *raleos precomerciales* suelen maximizar el rendimiento de una plantación mientras que un *raleo comercial* permite maximizar el valor económico (Forrest 1973, Wagle *et al.* 2022).

En plantaciones manejadas de forma intensiva al raleo se le antecede la intervención de poda, donde se remueven las ramas vivas sólo de aquellos árboles que se favorecerán con el raleo. Para este tipo de intervención también se debe definir la intensidad y oportunidad. En el primer caso, se ha reportado para *P. radiata* que en esta intervención se debe extraer como máximo entre un 30 y 40 % de la copa verde para no disminuir el crecimiento de los individuos (Sutton y Crowe 1975, Hinze y van Laar 1986, Ojeda 2018). Mayores niveles de intensidad aumentan la probabilidad de aparición de brotes epicórmicos que reducen la calidad de la madera (Sutton y Crowe 1975, Hevia *et al.* 2016). Por otro lado, la cantidad de volumen libre de nudos dependerá de la oportunidad de la poda. Maclaren (1993) señala que el diámetro sobre muñón (DSM) que corresponde al mayor diámetro del verticilo podado es la variable que mejor determina cuándo realizar esta intervención. Sutton y Crowe (1975) sugieren que esta actividad silvícola debe realizarse para esta especie, como máximo cuando el DSM alcanza los 12,5 cm. En Chile, los regímenes de poda actuales recomiendan realizar 1 poda inicial y 2 levantes, todas con periodicidad comenzando a los 5 años, hasta alcanzar una altura de poda de 5,8 m, en otros manejos se reducen a dos levantes con una altura de poda de 3 m.

Según Bose *et al.* (2018), a nivel de rodal el efecto de una intervención de raleo puede variar según la densidad arbórea, la distribución diamétrica del rodal previa al raleo, la edad del rodal, la calidad del sitio y el tipo de raleo ejecutado. El efecto del raleo se espera sea mayor en plantaciones forestales que en bosques naturales. Esto se debe a que la densidad y ubicación espacial de los individuos que componen una plantación es controlada desde su establecimiento, lo que permite un uso óptimo del sitio y un desarrollo homogéneo de los árboles. Por otro lado, la edad de una plantación al ser conocida favorece la ejecución oportuna de esta intervención silvícola.

Para plantaciones de *Pinus Ellioti*, *Pinus brutia*, *Pinus silvestris* se ha reportado que una alta intensidad de raleo reduce significativamente el rendimiento y crecimiento tanto en área basal como en volumen total respecto al testigo (Rebottaro y Cabrelli 2007, Nilsson *et al.* 2010, Erkan *et al.* 2023). Un comportamiento similar ha sido reportado para plantaciones de *P. radiata*. Se ha observado que una reducción de densidad entre el 70 y 80 % de la densidad inicial que, equivale a dejar 200 - 300 arb ha⁻¹

presenta un menor crecimiento y rendimiento que el testigo al cabo de 10 años de ejecutada la intervención (Whyte y Woollons 1990, Woollons *et al.* 1994, West 1998, Ferrere *et al.* 2015). Hernández (1991) y Espinosa *et al.* (1994) para plantaciones de *P. radiata* en Chile reportaron que la ejecución de un raleo a desecho con intensidades de raleo en que se redujo el 40 – 50 % de la densidad inicial igualan el rendimiento tanto en área basal como en volumen total respecto al testigo. Contrariamente, Jackson *et al.* (1983) observó que a la edad de 13 años el testigo alcanzó un mayor rendimiento en comparación al tratamiento que consideró la aplicación de un raleo a desecho a 741 arb ha⁻¹ a la edad de 5 años. En un primer raleo comercial que consideraron densidades residuales de entre 600 - 800 arb ha⁻¹ reportaron un mayor rendimiento en área basal y volumen total respecto al testigo (van Laar 1979, Rivera *et al.* 1985). Este comportamiento también ha sido reportado por Vega (2000), quien determinó que una reducción del 50 % de la densidad en un segundo raleo comercial, equivalentes a 400 arb ha⁻¹ permite alcanzar un mayor rendimiento en área basal y volumen total respecto al testigo luego de 13 años de realizada la intervención.

En plantaciones de *P. radiata* se ha observado que la intensidad de un raleo a desecho o comercial tienen un efecto sobre la distribución diamétrica (Rivera *et al.* 1985, Whyte y Woollons 1990, Espinoza *et al.* 1994). El mayor crecimiento de los árboles remanentes produce una mayor proporción de individuos en clases diamétricas superiores. Por otro lado, en bosques naturales de piceas (*Picea* spp.) y abetos (*Abies* spp.) se ha reportado que el volumen comercial se ve reducido por la ejecución de un raleo a desecho o comercial al cabo de 16 - 18 años, sin embargo, los árboles remanentes producen un mayor volumen aserrable respecto a los individuos presentes en rodales no intervenidos (Wagle *et al.* 2022). Contrariamente, en plantaciones forestales de *P. radiata* Rocuant (1970) reportó que la ejecución de un raleo comercial a los 19 años considerando una extracción del 10 % del área basal obtuvo luego de 7 años un volumen comercial superior al testigo, mientras que con una intensidad del 25 % se alcanzaron volúmenes comerciales similares. Igualmente, Shepherd y Forrest (1973) concluyeron que el mayor rendimiento en volumen comercial respecto al testigo se obtuvo al reducir el 45 %, 22 % y 28 % del área basal en el primer, segundo y tercer raleo, respectivamente.

A nivel de árbol individual se ha reportado que el efecto del raleo dependerá de la masa fotosintética, edad del rodal, tamaño del árbol, tipo e intensidad del raleo (van Laar 1969, Anning y McCarthy 2013, Missanjo y Kamanga 2015). En relación con la masa fotosintética, Mason (2023) plantea que tiene una alta correlación con el crecimiento diametral, ya que está asociada con una mayor intercepción de radiación. En segundo lugar, es esperable que raleos ejecutados a edades avanzadas tengan un menor efecto en el crecimiento de los árboles respecto a raleos oportunos. En relación con el tamaño del árbol,

se ha demostrado que individuos de mayores dimensiones, asociados a clases sociológicas dominantes poseen las mayores tasas de crecimiento diametral a diferencia de tamaños inferiores (West y Borough 1983, Pretzsch *et al.* 2021). La intensidad del raleo, libera recursos esenciales para el crecimiento tales como el espacio vital, luz, agua y elementos nutritivos. El tipo de raleo determina la clase de árbol que se estaría beneficiando de una mayor disponibilidad de recursos: Por ejemplo, un raleo por lo bajo de baja intensidad en un rodal monoespecífico no debiese generar un efecto considerable en el crecimiento del rodal, pues no habría un efecto sobre los árboles que dominan el dosel y que tienen las mayores tasas de crecimiento.

Para bosques naturales y plantaciones forestales compuestas por diferentes especies se ha reportado que la aplicación de un raleo a desecho y comercial permiten alcanzar mayores crecimientos en diámetro en comparación con árboles localizados en rodales no intervenidos (Díaz *et al.* 2012, Güney *et al.* 2022, Houtmeyers y Brunner 2022). Para plantaciones de *P. radiata* se ha reportado que el diámetro y el volumen medio por árbol aumentan significativamente con una mayor intensidad de raleo (Schickhardt 1977, Espinosa *et al.* 1994, Vega 2000). Mason (2023) corrobora este comportamiento reportando que densidades de hasta 50 arb ha⁻¹ se mantiene un efecto positivo sobre el crecimiento en el diámetro medio. Diversos estudios indican que el volumen medio por árbol aumenta tanto por la intensidad como por el número de intervenciones de raleos (Schickhardt y García 1977, Rivera y Sobarzo 1992).

Se ha comprobado que la intervención de raleo en plantaciones de *P. radiata* bajo distintas intensidades no tiene un efecto significativo sobre la altura dominante (Shepherd y Forrest 1973). Whyte y Woollons (1990) no detectaron diferencias significativas en el desarrollo de la altura dominante comparando diversas intensidades de un primer raleo comercial ejecutado a los 7 años que variaron entre los 200 a 700 arb ha⁻¹. Jackson *et al.* (1983) tampoco detectaron un efecto en la altura dominante al comparar dos regímenes de raleo, uno que consideró la ejecución de un raleo a desecho y un raleo comercial, y otro que consideró sólo la aplicación de un raleo a desecho. Sin embargo, otros autores han reportado un efecto de los raleos sobre el desarrollo en altura dominante para tratamientos que consideraron densidades residuales entre los 200 y 250 arb ha⁻¹ (West 1998). Maclaren *et al.* (1995) determinaron que para densidades residuales menores a 200 arb ha⁻¹ se produce un efecto negativo sobre el desarrollo de altura dominante. Este comportamiento también fue observado por Woollons *et al.* (1994) quienes determinaron que una intensidad de raleo a desecho del 80 % de la densidad inicial, equivalente a dejar 200 arb ha⁻¹ produjo una disminución de hasta 2 m en altura dominante respecto a densidades de 350, 500 y 1.200 arb ha⁻¹ luego de 6 años de realizada la intervención de raleo.

3. MÉTODOS

3.1. Ensayo de manejo silvícola Nihuinco

La información necesaria para el desarrollo de este estudio fue aportada por Forestal Mininco a través del Modelo Nacional de Simulación (MNS)². Durante el año 2008 la empresa estableció el ensayo de manejo silvícola “Nihuinco” en una plantación operacional de *P. radiata* que tiene un índice de sitio de 38 m. La instalación se realizó a la edad de 4 años y desde esa fecha se han realizado mediciones anuales. El propósito del ensayo fue determinar para sitios de alta productividad con silvicultura intensiva al establecimiento el efecto de la oportunidad y severidad de podas y raleos sobre el crecimiento y rendimiento a nivel de rodal y árbol individual. El ensayo Nihuinco se encuentra a 11 km al este de la comuna de Mulchén en la región del Biobío (37,76 ° latitud sur y 72,10 ° longitud oeste) y tiene una superficie de 11,5 ha. Según la clasificación climática de Köppen el ensayo está bajo un clima mediterráneo de lluvia invernal con una precipitación anual de 1884 mm concentrados en los meses de mayo a agosto, y presenta una temperatura media anual de 11,7 °C (Centro AGRIMED 2017). Se localiza sobre la serie de suelo Santa Bárbara, la cual se caracteriza por tener origen en cenizas volcánicas recientes, con una textura franca a franco limosa, suelen ser profundos a muy profundos con un buen drenaje y alta porosidad (CIREN 1999).

3.2. Diseño experimental

El diseño experimental aplicado corresponde a un diseño en bloques completamente aleatorio (Montgomery 2013). Se consideró la aplicación de distintos regímenes de raleos y podas, teniendo un total de 13 tratamientos más un testigo cada uno con tres repeticiones (anexo 1). La unidad muestral corresponde a una parcela de forma cuadrada de 1000 m²; agregando una zona buffer de 10 m alrededor de cada parcela aplicando el mismo tratamiento asignado aleatoriamente. Las variables de control que definieron la estructura de los tratamientos fueron:

VARIABLES DE CONTROL DE RALEOS:

Densidad residual raleo a desecho: 700 arb ha⁻¹

Densidad residual raleo comercial 1: 400 y 700 arb ha⁻¹

Densidad residual raleo comercial 2: 300, 400 y 500 arb ha⁻¹

³ www.mnssimulacion.cl

VARIABLES DE CONTROL DE PODAS:

Altura final de poda: 5,5 m

Severidad de poda (largo de copa residual): 4,0, 5,5 y 7,0 m

Proporción de árboles podados: 33, 50, 75 y 100 %.

Para la evaluación de regímenes de raleo sobre el rendimiento y crecimiento de las plantaciones se seleccionaron del ensayo sólo 6 tratamientos y el testigo (cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos seleccionados para el estudio que fueron contrastados con el testigo, indicando edad de ejecución (años) y densidad residual (arb ha⁻¹).

| Tratamiento | Tratamientos seleccionados según tipo de análisis | | |
|----------------------|---|-------------------------|-------------------------|
| | Raleo Desecho (RD) | Raleo Comercial 1 (RC1) | Raleo comercial 2 (RC2) |
| RD 700 | 4 / 700 | - | - |
| RC1 700 | - | 7 / 700 | 12 / 400 |
| RC1 400 ^a | - | 7 / 400 | - |
| RC2 500 ^a | - | 7 / 700 | 12 / 500 |
| RC2 400 ^a | - | 7 / 700 | 12 / 400 |
| RC2 300 ^a | - | 7 / 700 | 12 / 300 |

^a Tratamientos con aplicación conjunta de poda considerando como prescripción una altura final de poda de 5,5 m, largo de copa residual en cada levante de 4 m y una proporción de 75 % de árboles podados.

La figura 1 presenta las curvas de sobrevivencia para cada uno de los grupos de tratamientos considerados según el tipo de análisis realizado. A la edad de 5 años la densidad de la plantación de cada tratamiento y el testigo varía previo a la intervención entre los 1.300 a 1.500 arb ha⁻¹. Para el testigo se observa un aumento notorio de la tasa de mortalidad a partir de los 9 años, alcanzando a la edad de 18 años una densidad de 743 arb ha⁻¹.

Para el análisis del efecto del raleo a desecho (RD) se consideró contrastar la respuesta en rendimiento del tratamiento RD|700 y el testigo entre los 4 y 18 años (figura 1a). En comparación al testigo, la aplicación de un raleo a desecho de 700 arb ha⁻¹ (RD700) equivalente a una reducción de 51,0 % de la densidad permite disminuir la tasa de mortalidad alcanzándose una densidad de 560 arb ha⁻¹ a los 18 años.

Para el análisis del primer raleo comercial se contrastaron los tratamientos RC1|700, RC1|400 y el testigo respecto a las tasas de crecimiento acumulado e incremento periódico anual alcanzado entre los 7 a 12 años (figura 1b). Durante este período de 5 años para el testigo se produjo una reducción de densidad de 360 arb ha⁻¹ equivalente a una reducción del 26,2 % de los individuos. En cambio, para los tratamientos RC1|700 y RC1|400 la densidad post-intervención al cabo de 5 años fue de 677 arb ha⁻¹ y 390 arb ha⁻¹; equivalente a una tasa de mortalidad del 2,9 % y 2,5 %, respectivamente.

Para el análisis del segundo raleo comercial los tratamientos considerados fueron RC2|500, RC2|400, RC2|300 y el testigo respecto a las tasas de crecimiento acumulado e incremento periódico anual entre los 12 a 18 años (figura 1c). En un período de 6 años, el testigo presentó una mortalidad de 270 arb ha⁻¹ lo que representa una reducción del 26,7 % de la densidad. Mientras que, en los tratamientos RC2|500, RC2|400 y RC2|300 la mortalidad fue de 1,4 %, 5,0 % y 1,3 % en el mismo período, alcanzando densidades post-intervención de 490 arb ha⁻¹, 380 arb ha⁻¹ y 293 arb ha⁻¹ respectivamente.

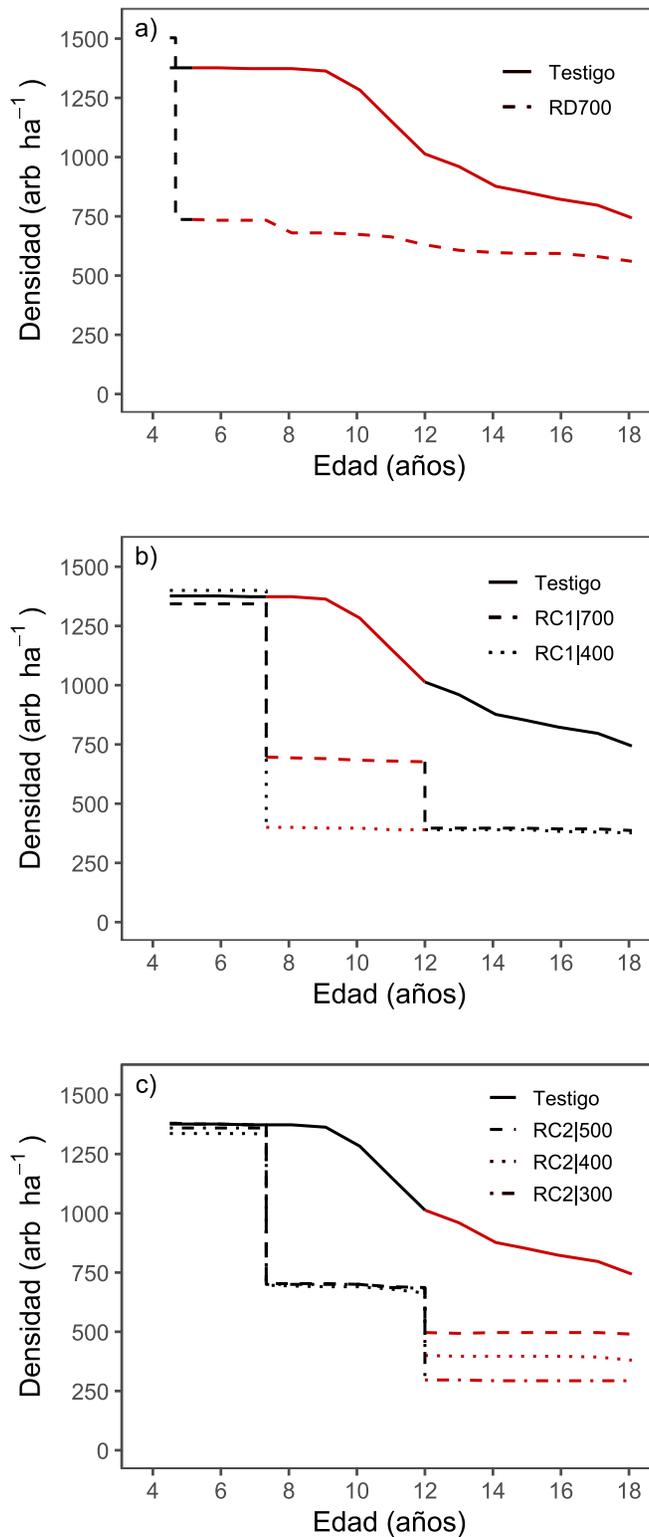


Figura 1. Curva de sobrevivencia para cada tratamiento (a) efecto del raleo a desecho (RD) , (b) efecto del primer raleo comercial (RC1) y (c) efecto del segundo raleo comercial (RC2). En color rojo se indica para cada caso el período de análisis contemplado.

3.3. Estimación de parámetros de rodal

Desde el establecimiento del ensayo se realizaron anualmente mediciones para cada uno de los árboles contenidos en cada parcela. Para el caso de tratamientos que consideraron la ejecución de intervenciones de raleos y/o podas se realizaron mediciones pre- y post-intervención. Las variables registradas para cada individuo correspondieron al diámetro a la altura del pecho (D), altura total (H), altura de comienzo de copa (Hc), clase de copa, clase de fuste, clase de fuste y condición del árbol de acuerdo con protocolos de medición establecidos por el MNS. Para el caso de los árboles podados se registró adicionalmente para cada levante de poda realizado la altura de poda (Hp), diámetro sobre muñón (DSM) y altura del DSM (HDSM).

Los datos registrados a nivel de árbol fueron procesados utilizando el simulador INSIGNE (v2023.3.17) calculándose para cada medición de las parcelas pre y post-intervención de raleos los siguientes parámetros de rodal: densidad (N, arb ha⁻¹), área basal (G, m² ha⁻¹), diámetro medio cuadrático (DMC, cm) y altura dominante (H₁₀₀, m). La altura dominante se definió como la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea (Prodan *et al.* 1997). Adicionalmente, para cada edad de medición se calculó el volumen total y comercial (m³ssc ha⁻¹) aplicando el esquema de trozado que se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Esquema de trozado aplicado para la obtención de volúmenes a nivel de productos.

| Producto | Código | Largo (m) | DMIN (cm) | Prioridad |
|-----------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| Debobinable grueso 1 | DG1 | 5,30 | 36 | 1 |
| Aserrable grueso 2 | AG2 | 4,10 | 24 | 3 |
| Debobinable delgado 1 | DD1 | 5,30 | 28 | 2 |
| Aserrable delgado 2 | AD2 | 4,10 | 18 | 4 |
| Pulpable | PULP | 2,44 | 8 | 5 |

El esquema de trozado aplicado prioriza la obtención de volumen debobinable de largo 5,30 m y diámetros 36 cm (grueso) y 28 cm (delgado), continuando con el aserrable de largo 4,10 m (grueso y delgado) y finalmente el producto pulpable.

3.4. Cálculo de tasas de crecimiento acumulado

Para el análisis del efecto del primer (RC1) y segundo raleo comercial (RC2) se utilizaron como variables respuestas el crecimiento acumulado (CA) e incremento periódico anual (IPA). Como se indicó previamente para el caso del RC1 se consideró el período de crecimiento entre los 7 a 12 años y para el RC2 entre los 12 a 18 años. El análisis comparativo de tasas de crecimiento acumulado se realizó para el área basal (G), diámetro medio cuadrático (DMC), altura dominante (H_{100}) y volumen total (VT). El crecimiento acumulado se calculó anualmente para el primer raleo comercial (RC1) en un período de 5 años ($i = 1, \dots, 5$) y para el segundo raleo comercial (RC2) en un período de 6 años ($i = 1, \dots, 6$) aplicando la siguiente fórmula

$$CA_i = Y_i - Y_0, \quad [1]$$

donde CA_i es el crecimiento acumulado para el i -ésimo año post raleo, Y_i es el rendimiento observado en el i -ésimo año post raleo e Y_0 es el rendimiento observado a la edad del raleo luego de realizada la intervención. Este procedimiento permitió utilizar una misma escala para todos los tratamientos facilitando su comparación y evaluación del efecto de la intensidad del raleo sobre las tasas de crecimiento. El rendimiento observado para cada uno de los parámetros dasométricos evaluados se presenta en el anexo 2. Posteriormente, a partir del crecimiento acumulado se calculó el incremento periódico anual (IPA) utilizando la siguiente fórmula

$$IPA_i = \frac{CA_i}{i}. \quad [2]$$

El cálculo del IPA permitió determinar la duración y comportamiento del efecto del raleo aplicando distintas intensidades para cada uno de los parámetros evaluados respecto al testigo. El incremento periódico anual de cada uno de los parámetros evaluados se presenta en el anexo 3.

3.5. Análisis estadístico

Para cada uno de los tipos de análisis realizados la comparación del efecto de los tratamientos a distintas edades fue realizado aplicando un diseño experimental “bloques al azar” que presenta la siguiente estructura (Montgomery 2013)

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \rho_j + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, t; j = 1, \dots, b, \quad [3]$$

donde y_{ij} es la respuesta del i -ésimo tratamiento del j -ésimo bloque, μ es la gran media, τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento, ρ_j es el efecto del j -ésimo bloque y ε_i es el error aleatorio para el i -ésimo tratamiento del j -ésimo bloque. Previamente se comprobaron los supuestos básicos de error normalmente distribuido y homocedasticidad de la varianza a través de la prueba Shapiro-Wilk y de Bartlett, respectivamente. Para la comparación de medias tras detectarse diferencias significativas en el análisis de varianza (ANOVA) se aplicó la prueba de rangos múltiples de Duncan (Gutiérrez y de la Vara 2008)

$$R_p = q_\alpha(p, l) \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_R^2}{n}} \quad p = 2, 3, \dots, k, \quad [4]$$

$q_\alpha(p, l)$ corresponde al valor crítico del rango significativo de Duncan, donde α es el nivel de significancia, p es la cantidad de k medias comparadas, l los grados de libertad del error dados por $k-1$ y $\hat{\sigma}_R^2$ es la varianza residual. Esta prueba de comparaciones múltiples ha sido utilizada en estudios similares realizados previamente (Rivera y Sobarzo 1992, Vidal 2000).

La comparación de las distribuciones diamétricas observadas entre el testigo y RD700 para las edades 6, 10, 14 y 18 años fue realizada aplicando la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S), la cual está basada en la siguiente expresión (Sheskin 2000)

$$D_{max} = \max |F_{Testigo}(x) - F_{Trt}(x)|, \quad [5]$$

donde D_{max} corresponde a la máxima distancia obtenida entre la distribución acumulada para la variable diámetro (x) de la población Testigo ($F_{Testigo}$) y el tratamiento que se compara (F_{Trt}). Posteriormente para determinar la significancia de dicho estadístico, el valor calculado fue comparado con un valor tabulado correspondiente a la tabla de valores críticos de la prueba K-S para dos muestras independientes (Sheskin 2000).

En todas las pruebas estadísticas se consideró un nivel de significancia del 95 %. El procesamiento de la base de datos y análisis estadístico realizado fueron implementados en el software estadístico R version 4.4.1 (R core team 2024) utilizando las librerías *dyplr* versión 1.1.4 (Wickham *et al.* 2023) para el manejo de datos, y *agricolae* versión 1.3-7 (de Mendiburu 2023) para la comparación de medias.

4. RESULTADOS

4.1. Efecto del raleo a desecho

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos para cuantificar el efecto del raleo a desecho (RD) sobre el rendimiento de una plantación. En primer lugar, en la figura 2 se presentan las curvas de rendimiento observadas hasta los 18 años del G, DMC, H_{100} y VT para RD700 y el testigo. En el cuadro 3 se presenta la comparación estadística obtenida para estos parámetros. A partir de la figura 3 se compara estadísticamente el desarrollo de las distribuciones diamétricas de RD700 y el testigo a los 6, 10, 14 y 18 años. Finalmente, en base al cuadro 4 se analiza el efecto del RD sobre el volumen comercial y distribución de productos.

4.1.1. Comparación de rendimientos

A partir de las curvas de rendimiento se puede inferir que el testigo presenta durante los primeros años un mayor rendimiento en G. Sin embargo, desde los 9 años se observa un notorio declive en el rendimiento de este parámetro debido a una mayor mortalidad de árboles (figura 1), lo que permitió que a partir de los 14 años el tratamiento RD700 alcance rendimientos similares. Debido a la ejecución del raleo a desecho se observa un desarrollo divergente en el DMC. De la curva de rendimiento se aprecia que entre los 4 a 8 años el tratamiento RD700 posee una mayor pendiente que el testigo, asociado a un mayor crecimiento en este parámetro. Posteriormente se observa un desarrollo paralelo, lo que sugiere una pérdida del efecto del raleo a desecho. A pesar de esta pérdida, el mayor crecimiento alcanzado entre los 4 – 8 el testigo no logró alcanzar a RD700, observando un desarrollo notoriamente inferior hasta los 18 años. En cuanto a la H_{100} no se aprecia un efecto del RD, confirmando que este parámetro no es afectado por una disminución de la densidad a 700 arb ha^{-1} a la edad de 4 años. Finalmente, un comportamiento similar al del área basal se presenta para el VT, pero una magnitud mucho menor donde a la edad de 18 años el tratamiento RD700 alcanza un rendimiento similar al testigo.

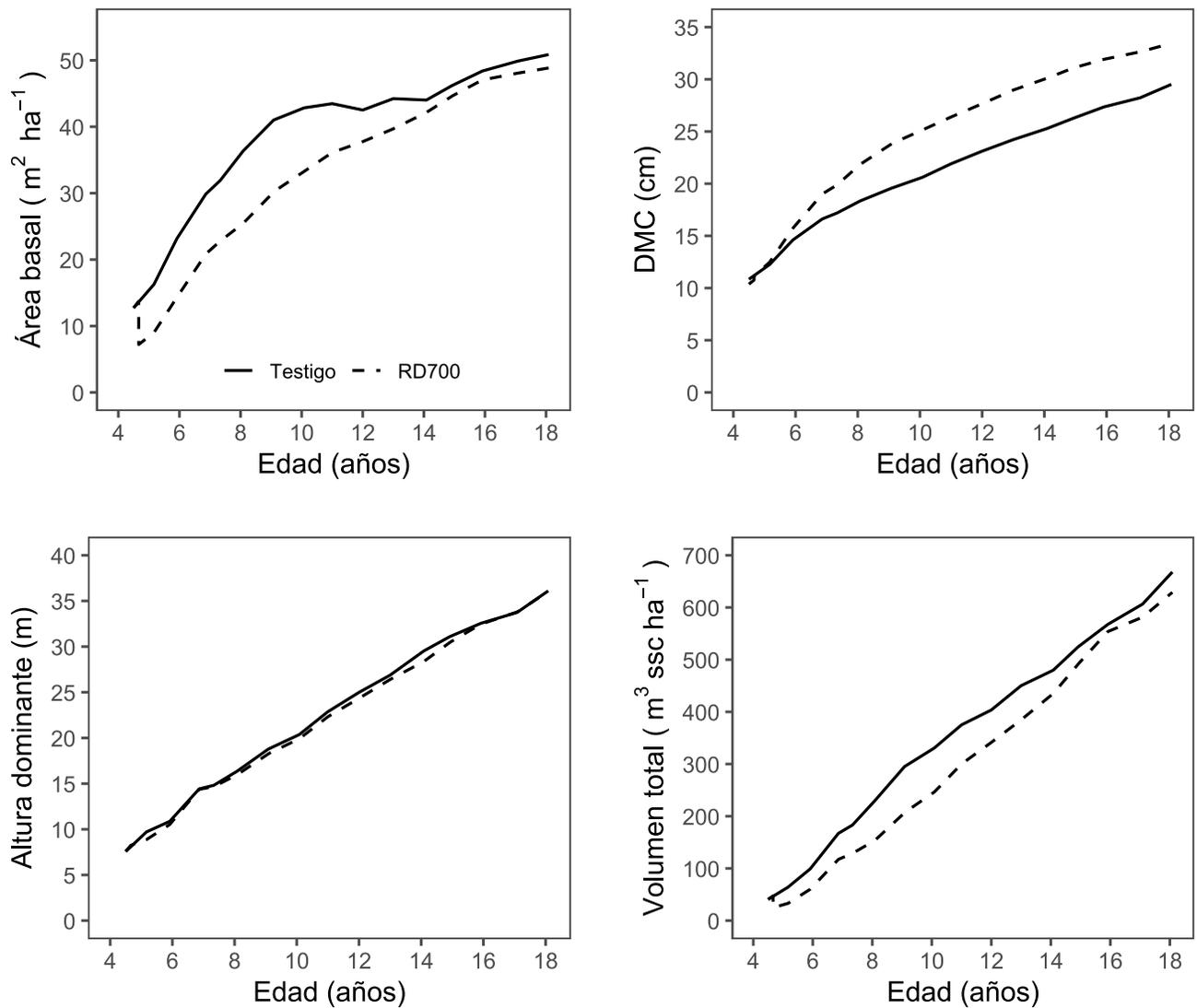


Figura 2. Curvas de rendimiento observadas para el G, DMC, H_{100} y VT para el testigo (línea continua) y RD700 (línea segmentada).

Estadísticamente no se detectan diferencias significativas en el rendimiento para el G a partir de los 10 años y para el VT a partir de los 12 años. Para el caso del DMC se detectan diferencias significativas desde los 8 años presentándose una diferencia de 3,9 cm a la edad de 18 años. En cuanto a la H_{100} no se detectaron diferencias significativas para ninguna de las edades entre el testigo y el tratamiento RD700, a los 18 años se alcanzan rendimientos similares de 36,1 y 36,0 m respectivamente.

Cuadro 3. Comparación de rendimiento entre el testigo y el tratamiento RD700 para las distintas edades. Letras distintas indican diferencias significativas (p -valor $< 0,05$).

| Parámetro | Tratamiento | Condición | | Edad (años) | | | | | | |
|---|-------------|-----------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | Pre-raleo | Post-raleo | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| N (arb ha ⁻¹) | Testigo | 1377 | - | 1377 | 1373 | 1283 | 1013 | 877 | 823 | 743 |
| | RD700 | 1503 | 737 | 733 | 680 | 673 | 630 | 597 | 593 | 560 |
| G (m ² ha ⁻¹) | Testigo | 12,7 | - | 23,1 ^b | 36,3 ^b | 42,8 ^a | 42,5 ^a | 44,0 ^a | 48,4 ^a | 50,9 ^a |
| | RD700 | 12,7 | 7,2 | 14,3 ^a | 25,4 ^a | 33,3 ^a | 37,8 ^a | 42,2 ^a | 47,1 ^a | 48,8 ^a |
| DMC (cm) | Testigo | 10,8 | - | 14,6 ^a | 18,4 ^b | 20,6 ^b | 23,1 ^b | 25,3 ^b | 27,4 ^b | 29,5 ^b |
| | RD700 | 10,4 | 11,1 | 15,7 ^a | 21,9 ^a | 25,2 ^a | 27,7 ^a | 30,1 ^a | 31,9 ^a | 33,4 ^a |
| H ₁₀₀ (m) | Testigo | 7,6 | - | 10,9 ^a | 16,4 ^a | 20,4 ^a | 25,0 ^a | 29,5 ^a | 32,5 ^a | 36,1 ^a |
| | RD700 | 7,6 | 8,3 | 10,5 ^a | 16,0 ^a | 19,9 ^a | 24,3 ^a | 28,4 ^a | 32,5 ^a | 36,0 ^a |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹) | Testigo | 40,9 | - | 99,3 ^b | 229,7 ^b | 330,7 ^b | 403,6 ^a | 479,9 ^a | 567,6 ^a | 667,9 ^a |
| | RD700 | 40,6 | 25,0 | 60,3 ^a | 153,6 ^a | 246,3 ^a | 341,4 ^a | 435,2 ^a | 553,8 ^a | 628,9 ^a |

4.1.2. Comparación de la distribución diamétrica

La prueba de K-S detectó a partir de los 6 años diferencias altamente significativas (p -valor $< 0,001$) entre ambas distribuciones diamétricas. Para cada una de las edades analizadas el tratamiento RD700 presentó una mayor cantidad de árboles en clases diamétricas superiores lo cual explica un mayor DMC (cuadro 3). Por lo tanto, se puede inferir que la ejecución de un raleo a desecho a una densidad residual de 700 arb ha⁻¹ tuvo un efecto significativo sobre el desarrollo de la distribución diamétrica de la plantación.

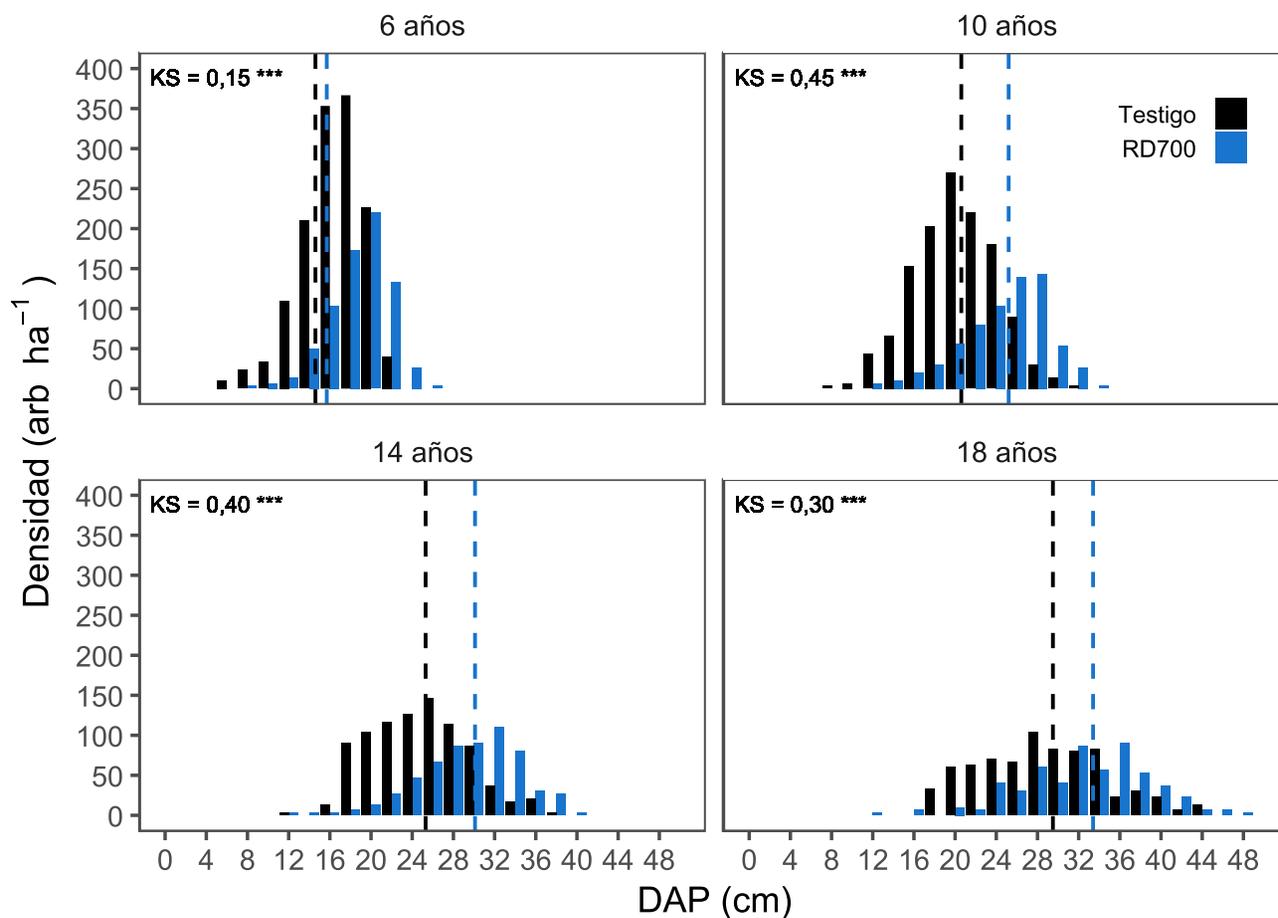


Figura 3. Distribución diamétrica para el testigo y el tratamiento RD700 a la edad de 6, 10, 14 y 18 años. La línea segmentada vertical indica el DMC.

4.1.3. Comparación de volúmenes de productos

A la edad de 18 años no se detectaron diferencias significativas en el volumen comercial entre RD700 y el testigo. Por lo tanto, el tratamiento RD700 acumula con una menor densidad de árboles el mismo volumen comercial que el testigo. A nivel de productos se detectaron diferencias significativas, en primer lugar, el producto aserrable grueso 2 (AG2) con un diámetro menor de 24 cm y un largo de 4,1 m fue significativamente mayor en RD700, presentando una diferencia de 87,4 m³ssc ha⁻¹ respecto al testigo. Y también para el producto pulpable (PULP), el testigo fue significativamente mayor en comparación al tratamiento RD700, con una diferencia de 73,8 m³ssc ha⁻¹. Para el producto aserrable delgado 2 (AD2) no se detectaron diferencias significativas entre el testigo y RD700. En términos porcentuales la ejecución de un raleo a desecho disminuyó el volumen pulpable en un 10,2 % a comparación del testigo. Sin embargo, la mayor proporción de individuos de mayores dimensiones del

tratamiento RD700 permitió un mayor volumen aserrable grueso 2 (AG2) con una diferencia porcentual del 16,2 % respecto al testigo.

Cuadro 4. Volumen comercial de cada producto obtenido para el testigo y el tratamiento RD700 a la edad de 18 años. Letras distintas indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

| Tratamiento | Volumen (m ³ ssc ha ⁻¹)* | | | | | Volumen comercial (%) | | | |
|-------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|------|------|-------|
| | Total | Comercial | AG2 | AD2 | PULP | AG2 | AD2 | PULP | Total |
| Testigo | 667,9 ^a | 653,4 ^a | 240,0 ^a | 224,0 ^a | 190,0 ^a | 36,8 | 34,3 | 29,0 | 100 |
| RD700 | 628,9 ^a | 618,2 ^a | 327,4 ^b | 175,0 ^a | 116,2 ^b | 53,0 | 28,3 | 18,8 | 100 |

* Los productos DG1 y DD1 no obtuvieron volumen a la edad de 18 años.

4.2. Efecto de la intensidad del primer raleo comercial

A continuación, se analiza el desarrollo del crecimiento acumulado (CA) de cada parámetro de rodal (G, DMC, H₁₀₀ y VT) para el período de crecimiento contemplado desde los 7 a 12 años posterior a RC1, desarrollo que es presentado en la figura 4. Posteriormente, en base al cuadro 5 se presentan las comparaciones estadísticas obtenidas del CA. Y finalmente, se analiza el comportamiento del incremento periódico anual (IPA) que es presentado en la figura 5 y la comparación estadística en el anexo 3.

4.2.1. Comparación del crecimiento acumulado

A partir de las curvas de crecimiento acumulado (figura 4) se observa que el tratamiento RC1|700 comienza a superar al testigo en G al segundo año y el tratamiento RC1|400 desde el tercer año de ejecutado el raleo. El mayor efecto del RC1 se observa para el DMC, ambos tratamientos a partir del primer año presentan un mayor crecimiento diamétrico de los árboles residuales en comparación al testigo. Por otro lado, se aprecian diferencias entre ambos tratamientos, aumentando el crecimiento diametral con la intensidad del raleo (RC1|400). Para la H₁₀₀ no se observan diferencias entre ambos tratamientos y el testigo durante todo el período evaluado. En relación con el VT, a pesar de que el testigo presenta una mayor mortalidad durante el período analizado, aún se mantiene con una mayor densidad de árboles en comparación a ambos tratamientos lo cual permite una mayor acumulación en este parámetro durante los 5 años posteriores al raleo. Sin embargo, al quinto año RC1|700 logra igualar al testigo. La mayor intensidad del tratamiento RC1|400 no permite acumular la misma cantidad de volumen que el tratamiento RC1|700 y el testigo durante el período de análisis.

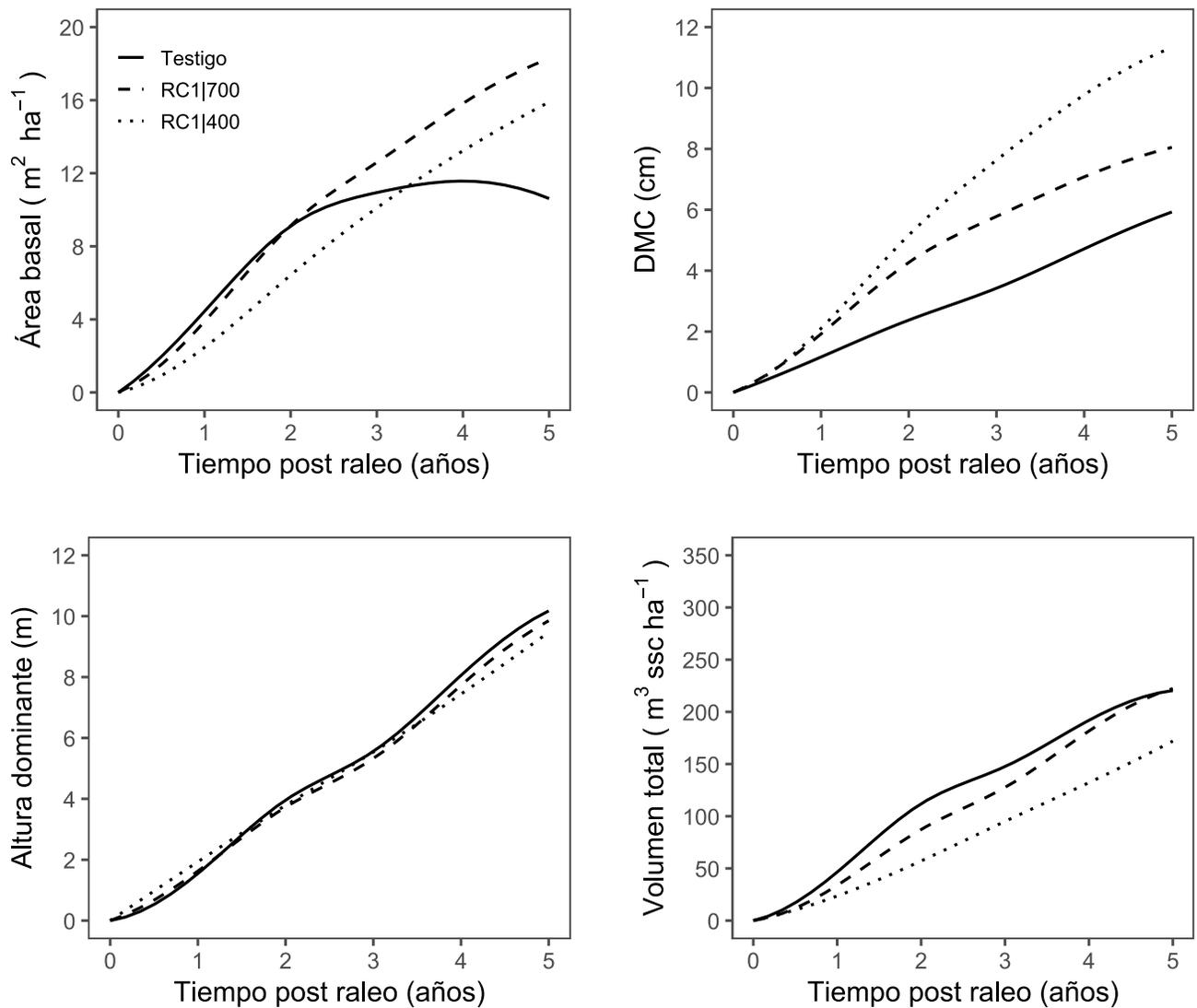


Figura 4. Curvas de crecimiento acumulado para el G, DMC, H_{100} y VT luego de ejecutado el primer raleo comercial a los 7 años.

A partir del análisis estadístico (cuadro 5) ambas intensidades de raleo aplicadas alcanzaron al quinto año de ejecutada la intervención una acumulación de G y DMC significativamente mayor en comparación al testigo. Para el G las diferencias entre los tratamientos RC1|700 y RC1|400 no fue significativa, y para el caso del DMC las diferencias entre tratamientos fue significativa. Por lo tanto, ambos tratamientos acumulan una misma cantidad de G; pero una mayor intensidad de raleo aumentó la tasa de crecimiento diametral de los árboles remanentes. Para el caso de la H_{100} no se detectaron diferencias significativas en el crecimiento acumulado durante todo el período evaluado comprobándose que la intensidad del raleo no tuvo ningún efecto. A diferencia del G, al quinto año de ejecutada la intervención no se detectaron diferencias significativas entre el tratamiento RC1|700 y el testigo respecto a la acumulación del VT. El

tratamiento RC1|400 presentó diferencias significativas con RC1|700 y el testigo. Esto permite inferir que en un sitio de alta productividad, una intensidad de RC1 de 700 arb ha⁻¹ puede acumular la misma cantidad de VT que una plantación no raleada.

Cuadro 5. Comparación de crecimiento acumulado luego de 5 años de ejecutado el primer raleo comercial aplicando dos intensidades. Letras distintas indican diferencias significativas (p -valor < 0,05).

| Parámetro | Tratamiento | Condición | | Número de años post-raleo | | | | |
|---|-------------|-----------|------------|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | | Pre-raleo | Post-raleo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| N (arb ha ⁻¹) | Testigo | 1373 | 1373 | 1373 | 1363 | 1283 | 1153 | 1013 |
| | RC1 700 | 1343 | 697 | 693 | 690 | 683 | 680 | 677 |
| | RC1 400 | 1400 | 400 | 400 | 397 | 397 | 390 | 390 |
| G (m ² ha ⁻¹) | Testigo | 31,9 | - | 4,4 ^a | 9,1 ^a | 10,9 ^a | 11,6 ^a | 10,6 ^a |
| | RC1 700 | 29,1 | 17,6 | 3,9 ^a | 9,1 ^a | 12,6 ^b | 15,8 ^b | 18,3 ^b |
| | RC1 400 | 31,3 | 9,7 | 2,5 ^b | 6,4 ^b | 10,1 ^a | 13,2 ^a | 15,9 ^b |
| DMC (cm) | Testigo | 17,2 | - | 1,2 ^a | 2,4 ^a | 3,4 ^a | 4,7 ^a | 5,9 ^a |
| | RC1 700 | 16,6 | 17,9 | 1,9 ^b | 4,3 ^b | 5,8 ^b | 7,1 ^b | 8,1 ^b |
| | RC1 400 | 16,9 | 17,6 | 2,1 ^c | 5,2 ^c | 7,6 ^c | 9,8 ^c | 11,3 ^c |
| H ₁₀₀ (m) | Testigo | 14,8 | - | 1,5 ^a | 4,0 ^a | 5,6 ^a | 8,1 ^a | 10,2 ^a |
| | RC1 700 | 14,6 | 14,6 | 1,6 ^a | 3,7 ^a | 5,3 ^a | 7,7 ^a | 9,9 ^a |
| | RC1 400 | 14,2 | 14,2 | 1,9 ^a | 3,9 ^a | 5,5 ^a | 7,4 ^a | 9,5 ^a |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹) | Testigo | 183,2 | - | 46,5 ^a | 112,0 ^a | 147,5 ^a | 191,9 ^a | 220,4 ^a |
| | RC1 700 | 165,6 | 101 | 33,8 ^{ab} | 87,4 ^b | 127,6 ^{ab} | 181,7 ^a | 222,3 ^a |
| | RC1 400 | 169,3 | 53,0 | 23,6 ^b | 57,2 ^c | 95,1 ^c | 132,2 ^b | 172,0 ^b |

4.2.2. Comparación de incremento periódico anual

Se observa un comportamiento similar en el incremento periódico anual del G entre los tratamientos RC1|700 y RC1|400 (figura 5). En ambos casos la curva de IPA aumenta inicialmente y luego de alcanzar un máximo disminuye paulatinamente. Para todo el período de análisis las tasas de incremento del tratamiento RC1|700 son mayores al tratamiento RC1|400. Para el caso del tratamiento RC1|700 el máximo (4,6 m² ha⁻¹ año⁻¹) ocurre al segundo año y para el tratamiento RC1|400 (3,4 m² ha⁻¹ año⁻¹) ocurre al tercer año de ejecutado el raleo. Estos puntos representan la edad donde se produce el mayor efecto

del raleo. El tratamiento RC1|400 presenta una menor pendiente luego de alcanzar el máximo en comparación al tratamiento RC1|700 lo que indica una mayor duración del efecto del raleo. El efecto del raleo en ambos tratamientos y la mayor mortalidad de árboles en el testigo produce que ambos tratamientos superen el IPA del testigo.

El efecto del raleo se aprecia también para el DMC donde ambos tratamientos presentan un comportamiento similar al G. En este caso, la intensidad de raleo aumenta significativamente la tasa de crecimiento diametral de los árboles remanentes, ya que la curva del tratamiento RC1|400 es durante todo el periodo superior que la curva del tratamiento RC1|700; ambos con un comportamiento ascendente-descendente. En ambos casos el crecimiento ascendente culmina tras dos años de ejecutado el raleo, presentando un valor máximo de $2,1 \text{ cm año}^{-1}$ para RC1|700 y $2,6 \text{ cm año}^{-1}$ para RC1|400. El efecto del raleo es notorio en comparación al testigo que presenta durante todo el período un incremento periódico anual prácticamente constante ($\sim 1,2 \text{ cm año}^{-1}$) y significativamente inferior respecto a ambos tratamientos.

En relación con la H_{100} no se observan diferencias entre ambos tratamientos y el testigo durante el período analizado. En todos los casos se observa un incremento periódico anual promedio de aproximadamente $1,9 \text{ m año}^{-1}$. En este caso, tampoco se observa un efecto del primer raleo comercial sobre las tasas de crecimiento en altura dominante.

Durante los cuatro primeros años el testigo presenta un mayor incremento periódico anual del VT en comparación a ambos tratamientos. Esto se explica nuevamente por la mayor densidad que presenta el testigo a pesar de una mayor tasa de mortalidad de individuos. Entre tratamientos el mayor IPA en VT se alcanza con una menor intensidad de raleo (RC1|700). Sin embargo, a partir del quinto año de realizada la intervención se observa que el tratamiento RC1|700 alcanza el mismo incremento periódico anual del testigo.

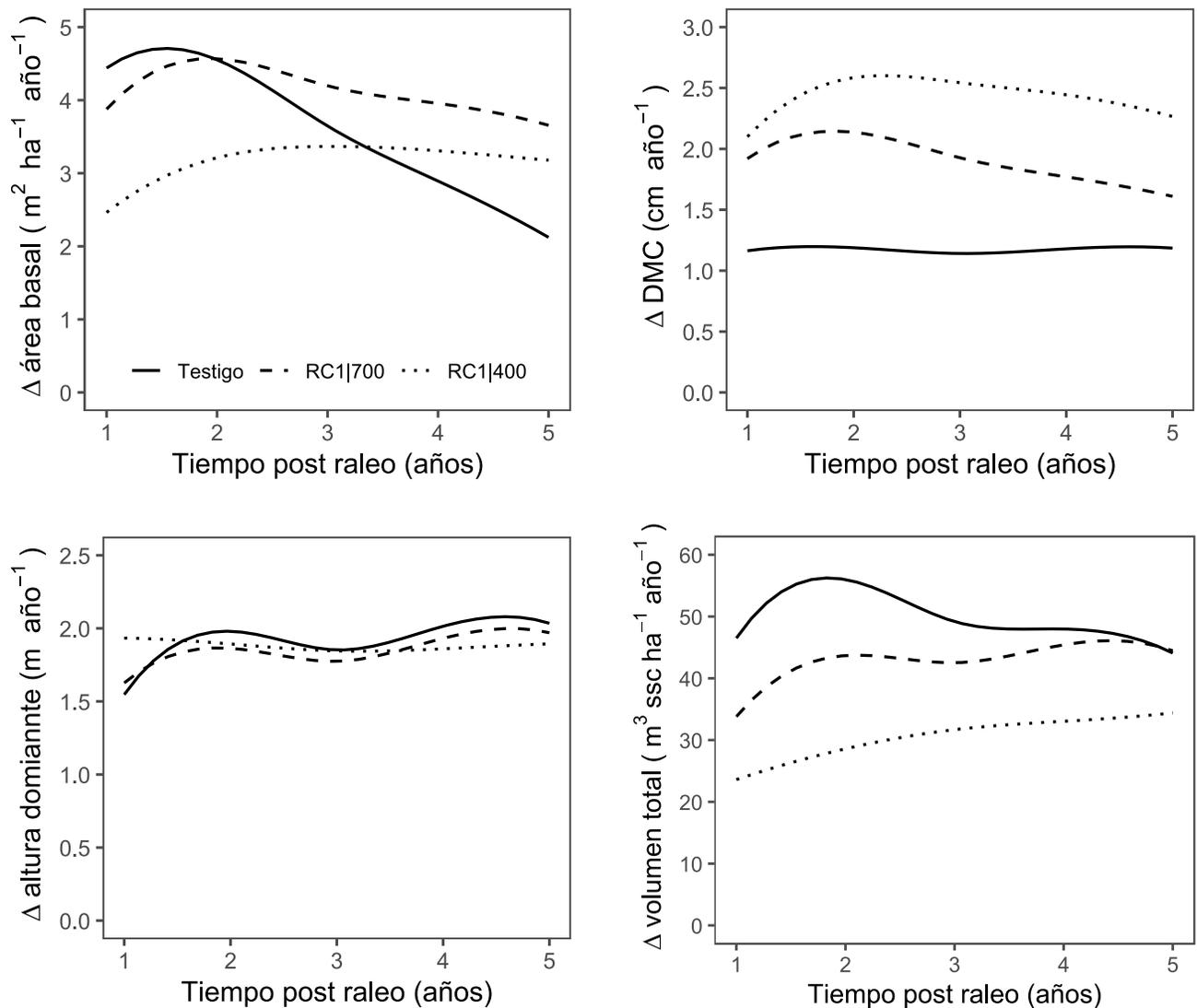


Figura 5. Comportamiento del incremento periódico anual (IPA) para el G, DMC, H_{100} y VT luego de ejecutado el primer raleo comercial a los 7 años.

4.3. Efecto de la intensidad del segundo raleo comercial

A continuación, se analiza el desarrollo del CA para el período de crecimiento contemplado desde los 12 a 18 años posterior a RC2, el desarrollo del CA de cada parámetro para el testigo, RC2|500, RC2|400 y RC2|300 es presentado en la figura 6. A partir del cuadro 6 se presentan las comparaciones estadísticas obtenidas del CA. Y posteriormente, se analiza el desarrollo del IPA obtenido para cada parámetro de rodal presentado en la figura 7 y la comparación estadística en el anexo 3.

4.3.1. Comparación del crecimiento acumulado

Un efecto notorio de la ejecución del RC2 se observa en la acumulación de G respecto al testigo (figura 7). Sin embargo, entre tratamientos el desarrollo fue similar a lo largo de los 6 años. La respuesta

en DMC también se ve afectada por la ejecución del RC2 por sobre la del testigo, aumentando considerablemente con una mayor intensidad de raleo (RC2|300). En el caso de la H_{100} , todos los tratamientos y el testigo presentan un desarrollo similar alcanzando luego de 6 años del raleo 12 m de altura dominante. En el VT no se observa un efecto de la intensidad del RC2 tan evidente como en el área basal. Sin embargo, durante todo el período el testigo tuvo un volumen acumulado levemente inferior a los tratamientos, contrario a lo que ocurre en el tratamiento RC2|500 que acumuló más volumen, además se aprecia que el volumen acumulado de RC2|400 es alcanzado por RC2|300 al cabo de 5 años del raleo.

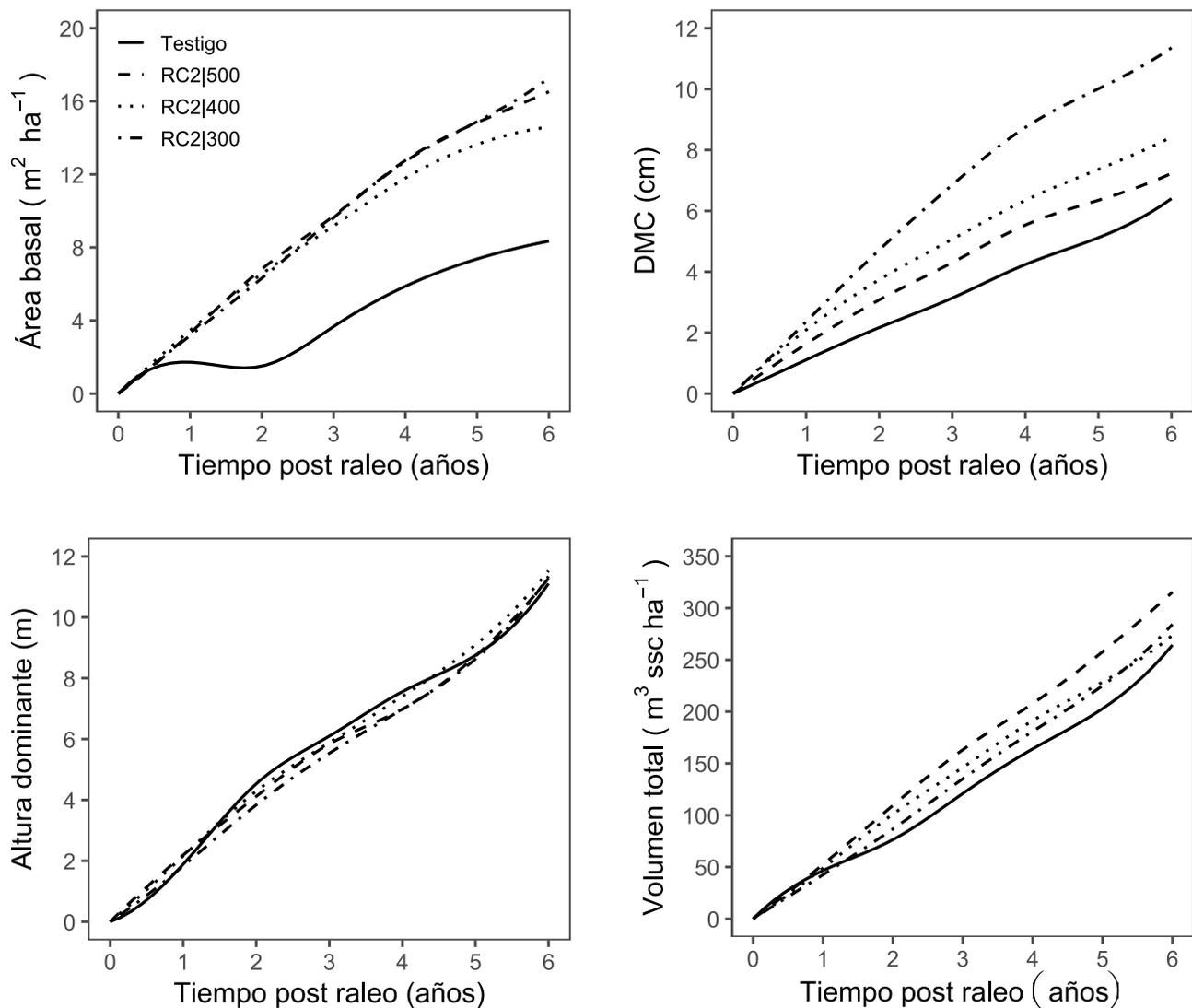


Figura 6. Curvas de crecimiento acumulado para el G, DMC, H_{100} y VT luego de ejecutado el segundo raleo comercial a los 12 años.

Todos los tratamientos superan significativamente al testigo en G desde el primer año tras el raleo (cuadro 6). Luego de 6 años de la intervención RC2|500, RC2|400 y RC2|300 acumularon un 98,8 %, 75,9 % y 108,4 % más de área basal que el testigo, respectivamente. A pesar de esto, no hubo un efecto de la intensidad de raleo, ya que no se detectaron diferencias significativas en ninguno de los años posteriores al raleo. Por otro lado, el DMC se ve afectado por la intensidad del RC2. A la edad de 18 años el tratamiento con el raleo más intenso obtuvo la mayor acumulación en este parámetro (RC2|300, 11,4 cm), a diferencia del tratamiento con menor intensidad de raleo (RC2|500, 7,2 cm) y el testigo (6,4 cm). Por su parte, el crecimiento acumulado de la altura dominante no presentó diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo en ninguno de los años evaluados, por lo tanto, la intensidad de un RC2 no tuvo ningún efecto en su desarrollo. Respecto a la acumulación del VT, al cabo de 6 años de realizada la intervención todos los tratamientos alcanzaron volúmenes estadísticamente homogéneos respecto al testigo, esto indicaría que tras ese período de tiempo la capacidad de crecimiento en volumen total no se ve afectada por la intensidad del RC2.

Cuadro 6. Comparación de crecimiento acumulado luego de 6 años de ejecutado el segundo raleo comercial aplicando tres intensidades de raleo. Letras distintas indican diferencias significativas (p -valor $< 0,05$).

| Parámetro | Tratamiento | Condición | | Número de años post-raleo | | | | | |
|---|-------------|-----------|------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | Pre-raleo | Post-raleo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| N (arb ha ⁻¹) | Testigo | 1013 | - | 960 | 877 | 853 | 823 | 797 | 743 |
| | RC2 500 | 687 | 497 | 497 | 497 | 497 | 497 | 497 | 490 |
| | RC2 400 | 663 | 400 | 397 | 397 | 397 | 397 | 393 | 380 |
| | RC2 300 | 683 | 297 | 297 | 293 | 293 | 293 | 293 | 293 |
| G (m ² ha ⁻¹) | Testigo | 42,5 | - | 1,7 ^a | 1,5 ^a | 3,7 ^a | 5,9 ^a | 7,4 ^a | 8,3 ^a |
| | RC2 500 | 35,8 | 28,1 | 3,3 ^{ab} | 6,8 ^b | 9,7 ^b | 12,8 ^b | 14,8 ^b | 16,5 ^b |
| | RC2 400 | 33,2 | 23,3 | 3,5 ^b | 6,6 ^b | 9,6 ^b | 11,8 ^b | 13,6 ^b | 14,6 ^b |
| | RC2 300 | 33,0 | 18,0 | 3,2 ^{ab} | 6,3 ^b | 9,2 ^b | 12,7 ^b | 14,9 ^b | 17,3 ^b |
| DMC (cm) | Testigo | 23,1 | - | 1,1 ^a | 2,2 ^a | 3,1 ^a | 4,2 ^a | 5,1 ^a | 6,4 ^a |
| | RC2 500 | 25,7 | 26,8 | 1,6 ^b | 3,1 ^b | 4,3 ^b | 5,5 ^b | 6,4 ^{ab} | 7,2 ^{ab} |
| | RC2 400 | 25,3 | 27,2 | 2,1 ^{bc} | 3,7 ^b | 5,1 ^b | 6,3 ^b | 7,4 ^b | 8,4 ^b |
| | RC2 300 | 24,8 | 27,8 | 2,4 ^c | 4,7 ^c | 6,9 ^c | 8,7 ^c | 10,0 ^c | 11,4 ^c |
| H ₁₀₀ (m) | Testigo | 25,0 | - | 1,9 ^a | 4,5 ^a | 6,1 ^a | 7,6 ^a | 8,8 ^a | 11,1 ^a |
| | RC2 500 | 24,2 | 24,2 | 2,2 ^a | 4,1 ^a | 5,8 ^a | 7,0 ^a | 8,7 ^a | 11,3 ^a |
| | RC2 400 | 24,9 | 24,9 | 2,2 ^a | 4,3 ^a | 5,9 ^a | 7,4 ^a | 9,1 ^a | 11,5 ^a |
| | RC2 300 | 24,6 | 24,6 | 1,8 ^a | 3,8 ^a | 5,5 ^a | 7,0 ^a | 8,6 ^a | 11,3 ^a |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹) | Testigo | 403,6 | - | 46,6 ^a | 76,3 ^a | 120,9 ^a | 164,0 ^a | 202,8 ^a | 264,3 ^a |
| | RC2 500 | 326,0 | 256,6 | 52,4 ^a | 109,4 ^b | 163,2 ^b | 207,8 ^b | 257,8 ^b | 315,4 ^a |
| | RC2 400 | 301,9 | 213,6 | 48,9 ^a | 101,0 ^{bc} | 146,1 ^{bc} | 191,3 ^{ab} | 228,5 ^{ab} | 273,8 ^a |
| | RC2 300 | 294,4 | 164,5 | 42,5 ^a | 86,7 ^{ac} | 135,1 ^{ac} | 180,9 ^{ab} | 225,0 ^{ab} | 284,3 ^a |

4.3.2. Comparación del incremento periódico anual

La ejecución del RC2 en las densidades residuales evaluadas tuvieron incrementos periódicos anuales en G estadísticamente superiores a las del testigo durante todo el período analizado. Presentando el mayor efecto en RC2|500 al segundo año post raleo (3,4 m² ha⁻¹ año⁻¹), RC2|400 lo presentó al primer año (3,5 m² ha⁻¹ año⁻¹) y RC2|300 al 3er año (3,2 m² ha⁻¹ año⁻¹), mientras que el máximo IPA del testigo fue de 1,7 m² ha⁻¹ año⁻¹. Entre tratamientos no se detectaron diferencias significativas en el IPA del área basal para ninguno de los años evaluados. Lo que indica que la intensidad del RC2 no afecta el crecimiento en área basal para el período analizado.

Por otro lado, la ejecución del RC2 también tuvo un efecto sobre el incremento periódico anual del DMC. Desde el primer año todos los tratamientos tienen tasas significativamente superiores a las del testigo. En todos los tratamientos el mayor efecto ocurre al primer año luego del raleo con tasas máximas de $1,6 \text{ cm año}^{-1}$ (RC2|500), $2,1 \text{ cm año}^{-1}$ (RC2|400) y $2,4 \text{ cm año}^{-1}$ (RC2|300) que luego disminuyen paulatinamente. Además, el efecto sobre el DMC nuevamente incrementó con la intensidad del raleo RC2|300 fue el tratamiento con las tasas más altas en este parámetro. RC2|500 luego de 5 años del raleo presentó tasas estadísticamente homogéneas a las del testigo, lo que indica una pérdida del efecto del raleo. Contrariamente RC2|400 y RC2|300 se mantienen estadísticamente diferentes al testigo durante todo el período de análisis.

En el caso del desarrollo de la H_{100} , en ninguno de los años evaluados se detectan diferencias significativas. Por lo tanto, la intensidad del RC2 no afectó el desarrollo de la altura dominante durante 6 años tras el raleo.

Por su parte, los mayores crecimientos en volumen total se alcanzaron tras dos años luego del raleo en los tratamientos RC2|500 ($54,7 \text{ m}^3\text{ssc ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y RC2|400 ($50,5 \text{ m}^3\text{ssc ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que RC2|300 lo obtuvo al 6to año ($47,4 \text{ m}^3\text{ssc ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) lo que indicaría una respuesta más tardía del raleo, asociado al mayor tiempo requerido para el cierre de copas. Una mayor intensidad (RC2|300) permitió tasas volumétricas estadísticamente iguales a las del testigo durante todo el período analizado, en menores intensidades de raleo tanto RC2|400 como en RC2|500 presentaron tasas estadísticamente homogéneas luego de 4 y 6 años del raleo, respectivamente. Por lo tanto, al cabo de 6 años todos los tratamientos presentan tasas de incremento volumétrico estadísticamente iguales a las del testigo.

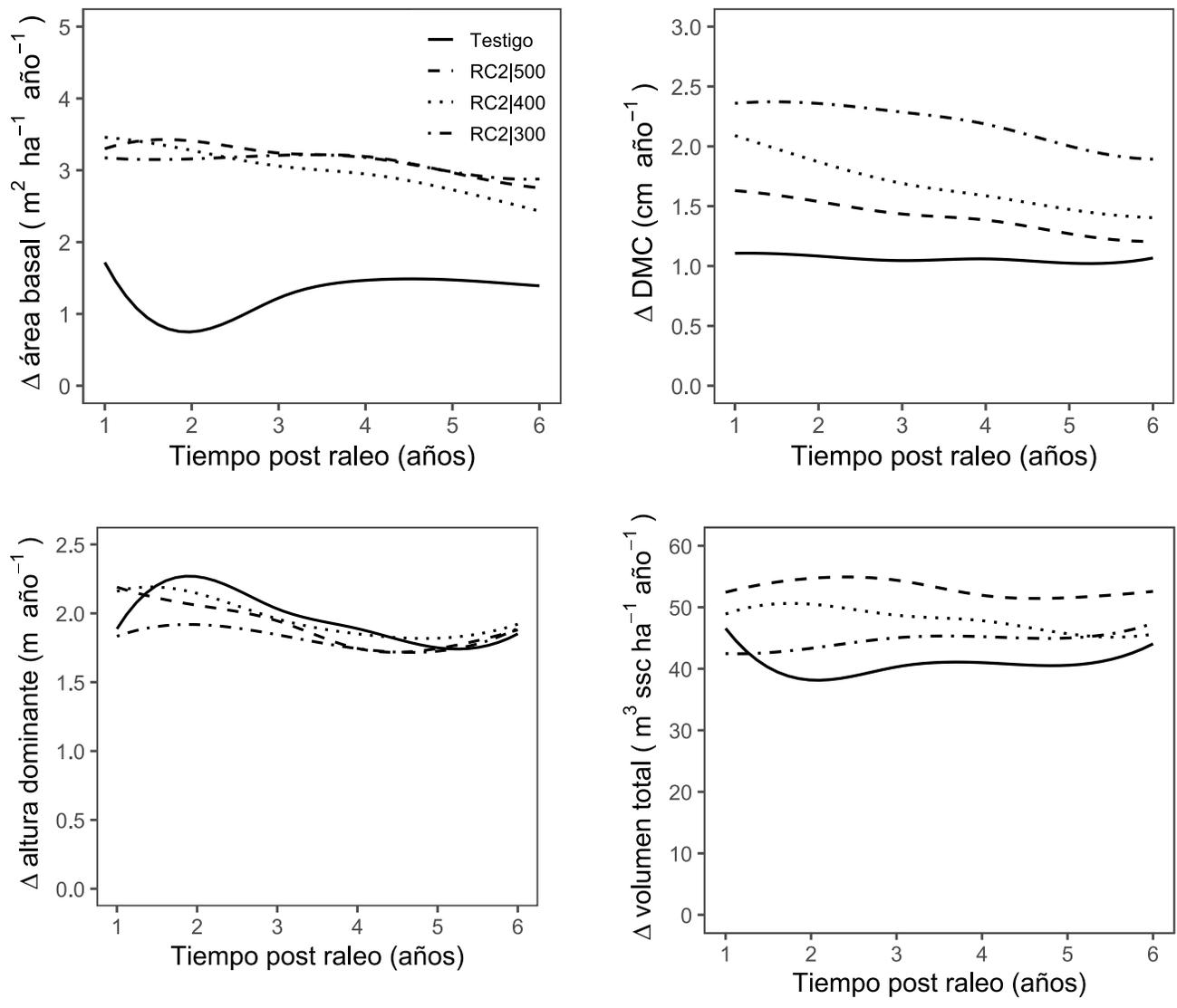


Figura 7. Comportamiento del incremento periódico anual (IPA) para el G, DMC, H_{100} y VT luego del ejecutado el segundo raleo comercial a los 12 años.

5. DISCUSIÓN

5.1. Efecto del raleo a desecho sobre el rendimiento

En este estudio para un sitio de alta productividad la ejecución de un RD a la edad de 5 años considerando una densidad residual a 700 arb ha^{-1} no tuvo a la edad de 18 años un efecto significativo sobre el rendimiento en área basal y volumen total en comparación a una plantación establecida con $1.377 \text{ arb ha}^{-1}$ (testigo). Para el G y VT no hubo diferencias significativas a partir de los 12 y 14 años, respectivamente. Este resultado coincide con el estudio reportado para la misma especie (IS: 29 m) por Espinosa *et al.* (1994), quienes no encontraron diferencias significativas de rendimiento en ambos parámetros a la edad de 12 años por efecto del RD. En este caso, se evaluaron cuatro intensidades de raleo de 400, 600, 800 y $1.200 \text{ arb ha}^{-1}$ que fueron ejecutados a la edad de 6 años. Esto indicaría que se podría incluso aumentar la intensidad y retrasar el raleo a desecho sin tener un impacto significativo en el rendimiento final. Un estudio previo, realizado por Hernández (1991) tampoco detectó diferencias significativas a la edad de 14 años en VT entre el testigo y un raleo realizado a los 5 años que redujo el 50 % de la densidad. Sin embargo, los resultados anteriores difieren de los reportados por Jackson *et al.* (1983), en esta investigación se ejecutó un raleo a la edad de 5 años considerando una densidad residual de 741 arb ha^{-1} que es similar a RD700 aplicado en este estudio. En este caso, a la edad de 13 años los rendimientos en G ($22 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) y VT ($129 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) del tratamiento con raleo a desecho fueron inferiores en comparación al testigo ($29 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} - 165 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Cabe señalar, que la densidad de plantación para este estudio fue de $2.224 \text{ arb ha}^{-1}$ lo cual es superior a los estudios anteriores. Esta mayor densidad inicial de plantación no permite realizar una comparación entre estudios y podría explicar la mayor capacidad de acumulación de G y VT del testigo. Jackson *et al.* (1983) no reporta el IS del ensayo, pero se infiere una productividad más baja a la que posee Nihuinco (IS: 38 m), pues al cabo de 8 años del raleo a desecho RD700 alcanza rendimientos en G ($38 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) y VT ($341 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) considerablemente mayores a las que se reportan en Jackson *et al.* (1983), quienes sugieren un sacrificio de la productividad debido a la intensidad de raleo.

El RD tuvo un efecto notorio sobre el DMC detectándose a partir de los 8 años una diferencia significativa con el testigo. A la edad de 18 años el DMC del testigo con una densidad de 743 arb ha^{-1} y el tratamiento con RD con una densidad de 560 arb ha^{-1} fueron de 29,5 cm y 33,4 cm, respectivamente. Por otro lado, la tasa de mortalidad post-intervención entre los 5 y 18 años fue de 46 % y 24 % (cuadro 3). Por lo tanto, el tratamiento de RD para poder alcanzar un mismo rendimiento que el testigo requiere aumentar la tasa de crecimiento diametral para compensar la menor densidad de individuos. Diversos estudios han reportado sobre el aumento de las tasas de crecimiento de los árboles luego de la ejecución

de un raleo a desecho (Vidal 2000, Drew y Downes 2018, Houtmeyers y Brunner 2022), sin embargo, en pocos se reporta que el tratamiento intervenido iguale el rendimiento del testigo (Hernández 1991, Espinosa *et al.* 1994). Lo que sugiere que la densidad remanente de RD700 logra el mayor crecimiento diametral posible y al mismo tiempo no perjudicar el rendimiento a nivel de rodal.

El RD no tuvo ningún efecto sobre el desarrollo en altura dominante alcanzando a la edad de 18 años una altura de 36,0 m y el testigo de 36,1 m. Este comportamiento también fue observado por Jackson *et al.* (1983) a densidades residuales post raleo a desecho de 741 y 371 arb ha⁻¹. Este mismo estudio demostró que la fertilización permite un aumento significativo en la altura dominante de la plantación, lo cual estaría asociado a un aumento temporal de la productividad, esto sugiere que la H₁₀₀ no depende de la densidad del rodal, sino que de la productividad del sitio que puede verse alterada a través de la fertilización. No obstante, Woollons *et al.* (1994) determinaron que la H₁₀₀ puede verse afectada por la densidad a intensidades de raleo a desecho muy elevadas, en específico, con densidades remanentes de 200 arb ha⁻¹, respecto a intensidades de 350, 500 y 1.200 arb ha⁻¹ que no tuvieron ningún efecto, tal como en este estudio. Maclaren *et al.* (1995) asociaría este comportamiento con el viento, ya que la velocidad de este sería mayor en rodales con bajas densidades, lo que reduce el crecimiento en este parámetro.

5.2. Efecto del raleo a desecho sobre la distribución diamétrica y volumen de productos

Un efecto importante del RD fue sobre la dinámica de la distribución diamétrica de la plantación detectándose diferencias significativas con el testigo. El RD aumentó significativamente la tasa de crecimiento de los árboles remanentes y por lo tanto el DMC de la plantación. Esto produjo que a partir de los 6 años se detectaran diferencias significativas en las distribuciones diamétricas con una mayor proporción de individuos en clases diamétricas superiores en el tratamiento con raleo en comparación al testigo. Este efecto de cambio de dinámica de la distribución diamétrica debido a la aplicación de raleos (desecho o comercial) ha sido reportado previamente para plantaciones de *E. nitens* en Chile (Muñoz 2005) y en bosques mixtos de *Picea* spp. – *Abies* spp. en Estados Unidos (Wagle *et al.* 2022). Otros estudios realizados en *P. radiata* reportan el mismo efecto, indicando además que la mayor proporción de árboles en clases diamétricas superiores aumenta con la intensidad del raleo (Rivera *et al.* 1985, Whyte y Wollons 1990, Espinosa *et al.* 1994).

Para el volumen comercial a la edad de 18 años tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento con RD (618 m³ssc ha⁻¹) y el testigo (653 m³ssc ha⁻¹). En este caso el volumen comercial corresponde a la agregación de volúmenes de los distintos tipos de productos. Este comportamiento estaría asociado a un mayor crecimiento a nivel de árbol individual debido a la ejecución del RD, como también a una mayor heterogeneidad en el crecimiento de los árboles presentes en el

testigo. Schickhardt (1977) analizó diversos tipos, intensidades y oportunidades de esta intervención demostrando en todos los casos que el diámetro normal y un diámetro a 5 m de los árboles favorecidos por el raleo fueron significativamente superiores al testigo. En rodales de *P. radiata* sin intervenciones se ha demostrado que aquellos árboles con mayores diámetros corresponden a los individuos con las mayores tasas de crecimiento diametral (West y Borough 1983). Lo que se complementa con lo que plantea Pretzsch *et al.* (2021) quienes determinaron que la posición sociológica de un individuo repercute en el crecimiento diametral y volumétrico a lo largo del árbol. Por lo tanto, en este estudio a pesar de una menor densidad del tratamiento RD respecto al testigo los árboles remanentes logran mayores dimensiones debido a la disminución de la competencia, lo que les permite un mayor volumen comercial. A nivel de productos el tratamiento de raleo presentó mayor cantidad y proporción de volumen aserrable grueso en comparación al testigo debido a la mayor dimensión de los árboles. Contrario a lo que ocurre en el testigo favoreciendo una mayor cantidad y proporción de volumen pulpable en comparación al tratamiento con RD. Esto permite inferir que el raleo a desecho no afecta el rendimiento de VC, pero tiene un efecto significativo y favorable en la distribución de productos a la edad de cosecha. Estos resultados no pueden ser contrastados con estudios anteriores ya que la mayoría no analiza el efecto de raleos sobre la distribución de productos.

5.3. Efecto de la intensidad del primer raleo comercial sobre el crecimiento a nivel de rodal

La ejecución de un primer raleo comercial a la edad de 7 años considerando densidades residuales de 700 y 400 arb ha⁻¹ permitió una mayor acumulación de área basal en comparación al testigo entre los 7 a 12 años. Para ambas intensidades de raleo no se detectaron diferencias significativas en acumulación de G para un período de 5 años. La menor acumulación de área basal del testigo se explicaría debido a la mayor tasa de mortalidad observada entre los 7 a 12 años, y el menor tamaño de los individuos. En términos de incremento periódico anual (IPA) en G los tratamientos y el testigo muestran un aumento hasta alcanzar un máximo y luego una disminución (ascendente-descendente). La menor intensidad de raleo (700 arb ha⁻¹) presentó significativamente una mayor tasa de incremento periódico en G que el tratamiento alternativo (400 arb ha⁻¹). Para el caso del testigo la disminución del IPA ocurre debido a la alta mortalidad de individuos observada a partir de los 9 años (figura 1). Contrariamente, para ambos tratamientos este comportamiento ascendente-descendente se debe a la ejecución del raleo. Para una densidad residual de 700 arb ha⁻¹ el valor máximo de IPA en G (4,6 m³ssc ha⁻¹ año⁻¹) se alcanzó al 2do año y para la densidad residual de 400 arb ha⁻¹ el valor máximo de IPA (3,4 m³ssc ha⁻¹ año⁻¹) al 3er año de ejecutado el raleo. Los resultados obtenidos indicarían que una mayor intensidad de raleo tendría una respuesta máxima más tardía y de mayor duración en el tiempo. Esto se puede inferir debido a la menor

tasa de disminución del IPA que se observa en el raleo más intenso posterior a alcanzar el máximo valor (figura 5). Este mismo comportamiento ha sido reportado por Whyte y Wollons (1990) quienes aplicaron a la edad de 7 años intensidades de raleo similares en plantaciones de *P. radiata*. Sin embargo, determinaron para una densidad residual entre 600 - 700 arb ha⁻¹ que la máxima respuesta en este parámetro ocurre al 5to año de ejecutado el raleo, mientras que entre 400 - 500 arb ha⁻¹ ocurre al cabo de 7 años, lo que difiere con el presente estudio. Esta diferencia se podría explicar principalmente por la alta productividad de Nihuinco (IS: 38 m), mientras que Whyte y Wollons (1990) reporta índices de sitio de 29,4 a 32,1 m para su estudio. Cabe señalar que ningún estudio sobre plantaciones de *P. radiata* en Chile se ha reportado empíricamente el efecto del raleo para esta magnitud de productividad.

Ambos tratamientos de raleo muestran claramente un efecto significativo sobre el crecimiento diametral de los árboles remanentes siendo significativamente mayores al testigo. En este caso, el tratamiento de mayor intensidad presentó al quinto año de ejecutado el raleo el mayor incremento en DMC (11,3 cm), seguido por el tratamiento de menor intensidad (8,1 cm) y el testigo (5,9 cm). Ambos tratamientos y el testigo presentaron diferencias estadísticamente significativas lo que demuestra el efecto del raleo sobre el comportamiento del DMC. Al igual que el área basal el DMC presenta un comportamiento ascendente-descendente alcanzándose la máxima respuesta alrededor del segundo año de ejecutado el raleo (figura 5). En este caso, la mayor intensidad de raleo muestra de manera similar al G una respuesta máxima algo más tardía y de mayor duración en el tiempo en comparación a la menor intensidad de raleo. Para el caso del testigo durante los 5 años de evaluación el incremento periódico anual fue prácticamente constante de 1,1 cm año⁻¹.

Para el caso de la altura dominante, ambas intensidades de raleos y testigo presentaron el mismo incremento de altura durante el período de 5 años que alcanzó a aproximadamente 9,5-10 m (cuadro 5) y un incremento periódico anual constante de aproximadamente 1,9 m año⁻¹ (figura 5). Esto demuestra que un raleo comercial ejecutado a los 7 años considerando densidades residuales de 700 y 400 arb ha⁻¹ no tiene un efecto significativo sobre la altura dominante.

La mayor acumulación de volumen total durante casi todo el período fue del testigo. Sin embargo, al quinto año de ejecutado el raleo el tratamiento de raleo de menor intensidad (700 arb ha⁻¹) tuvo la misma acumulación de VT que el testigo (220-222 m³ssc ha⁻¹) sin detectar diferencias significativas. Por su parte, el tratamiento de raleo con la mayor intensidad acumuló significativamente una menor cantidad de VT (172 m³ssc ha⁻¹). El comportamiento de RC1|400 estaría indicando una subocupación del sitio asociada a una alta intensidad de raleo, es decir, hay más recursos disponibles que árboles capaces de captarlos. Este comportamiento también fue observado por Whyte y Woollons (1990), 400 arb ha⁻¹ luego

del primer raleo comercial no son capaces de alcanzar el VT del testigo y a una densidad residual de 700 arb ha⁻¹, sin embargo, determinaron que densidades remanentes por debajo de 300 arb ha⁻¹ disminuyen considerablemente el crecimiento en este parámetro, lo que es ratificado por García (1990). Por otro lado, además de una menor densidad en RC1|400, un menor crecimiento pudo haberse acentuado debido a que este tratamiento recibió intervenciones de poda que consideraba una altura final de poda de 5,5 m (cuadro 1). Sin embargo, en cada levante se consideró dejar un largo de copa verde de 4 m evitando una extracción excesiva de ramas verdes, equivalentes a no extraer más del 30-40 % de las ramas vivas, lo que es respaldado por Sutton y Crowe 1975 y Ojeda 2018. Rivera *et al.* (1992) señala que una intensidad de poda que considere la extracción del 50 % de la copa verde podría anular por completo el efecto del raleo.

5.4. Efecto de la intensidad del segundo raleo comercial sobre el crecimiento a nivel de rodal

Al comparar el incremento periódico anual del área basal entre el testigo y la ejecución de un segundo raleo comercial (RC2), se observó que el crecimiento del testigo disminuye abruptamente desde los 9 a 15 años, estabilizándose por debajo de los 2 m² ha⁻¹ año⁻¹ hasta los 18 años. Este comportamiento difiere completamente con lo observado en RC2, en todos los tratamientos se observan tasas estables y notoriamente superiores al testigo. Y considerando que no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, sugiere que la ejecución del RC2 seguido de un RC1 a 700 arb ha⁻¹ (cuadro 1) permiten controlar las tasas de mortalidad y así lograr tasas de crecimiento estables, pero significativamente superiores a las del testigo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Vega (2000), quien evaluó el efecto de un segundo raleo comercial ejecutado a los 14 años, sin embargo, los tratamientos raleados no superan al testigo en la misma magnitud en que se observa en el presente trabajo. Esta diferencia nuevamente estaría asociada a la alta productividad de Nihuinco, lo que genera que hasta los 18 años mantenga una alta tasa de mortalidad, alcanzando una densidad de 743 arb ha⁻¹ que a diferencia de otros estudios el testigo a esa misma edad y densidades de plantación similares mantienen densidades sobre los 1.000 arb ha⁻¹ (Hernández 1991, Ribera *et al.* 1992).

El efecto del RC2 para el VT difiere de lo observado para el G. Al cabo de 6 años todos los tratamientos y el testigo alcanzan volúmenes estadísticamente homogéneos, lo que estaría explicado por una pérdida del efecto del raleo en RC2|400 y RC2|500 al 4to y 6to año respectivamente, y un efecto tardío de RC2|300. Esto se infiere pues en RC2|500 y RC2|400 alcanzan el máximo efecto al 2do año del raleo, mientras que RC2|300 ocurre al 6to año. Por su parte, Vega (2000) tampoco detectó diferencias estadísticas entre tres densidades residuales del RC2: 406, 356 y 304 arb ha⁻¹, sin embargo, todos los tratamientos fueron significativamente superiores en VMA respecto al testigo.

Por otro lado, una mayor intensidad del RC2 tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento acumulado en DMC. Al cabo de 6 años el mayor CA en este parámetro se alcanzó con una mayor intensidad de raleo (RC2|300, 11,4 cm), de estos resultados se infiere que dicha intensidad permite tasas de crecimiento a nivel de árbol individual que logran igualar las capacidades de crecimiento a nivel de rodal de 400 y 500 arb ha⁻¹. A pesar de esto, en todos los casos sugiere un crecimiento mucho más elevado que lo reportado por otros estudios, ya que a la edad de 18 años RC2|500, RC2|400 y RC2|300 alcanzan rendimientos de 34,5, 35,6 y 39,1 cm, respectivamente. Mientras que Vega (2000) para la misma edad reporta rendimientos en DMC de 31,9 y 34,5 para densidades residuales de 406 y 304 arb ha⁻¹ luego del RC2.

A diferencia de lo que se observó en el RC1, se aprecia una disminución de las tasas de crecimiento incluso con la ejecución del RC2. De las curvas de IPA del área basal se observa que ninguna intensidad evaluada en RC2 superó las tasas de crecimiento alcanzadas en RC1, comportamiento que también es observado por Vega (2000), donde el crecimiento en G era superior en el RC1. En el DMC al comparar el CA de los tratamientos RC1|400 y RC2|400, este último al cabo de 6 años acumuló 2,9 cm menos que lo que alcanzó RC1|400 en un año antes. Esta diferencia para cada parámetro entre períodos de crecimiento sugiere una disminución del crecimiento por efecto de una mayor edad de la plantación, no obstante, es considerablemente mayor en rodales no intervenidos.

Esto se puede corroborar a través del desarrollo de la H₁₀₀ durante el primer y segundo raleo comercial, durante todo ese período no se vio afectado bajo ninguna intensidad de raleo, comportamiento que también es reportado por múltiples trabajos ante variadas condiciones de sitio (Schickhardt 1977, Jackson *et al.* 1983, Wollons *et al.* 1990, Hernández 1991). Incluso en el tratamiento RC2|300, densidad residual en donde ciertos autores sugieren que el crecimiento en H₁₀₀ podría verse afectada (Woollons *et al.* 1994, Maclaren *et al.* 1995, West 1998). Sin embargo, desde los 12 a 18 años todos los tratamientos del RC2 y el testigo presentan curvas de IPA en este parámetro ligeramente descendientes, a comparación de lo observado entre los 7 a 12 años que son curvas más estables y relativamente constantes. Esta leve disminución en la productividad, asociado a la edad, estaría explicando crecimientos acumulados más bajos a los observados entre los 7 – 12 años.

6. CONCLUSIONES

A partir de este estudio de análisis del efecto de raleo a desecho y raleos comerciales sobre el rendimiento y crecimiento de una plantación de *P. radiata* en un sitio de alta productividad se puede concluir que la ejecución de un raleo a desecho aplicado a la edad de 4 años a una densidad residual de 700 arb ha⁻¹ no tiene un efecto en el rendimiento del área basal, volumen total y comercial a la edad de 18 años, comparado con un esquema de manejo pulpable que no considera intervenciones de raleo. Sin embargo, esta intervención incrementa el desarrollo a nivel de árbol, obteniéndose una mayor proporción de individuos en clases diamétricas superiores y de esa manera un mayor diámetro medio cuadrático aumentando la cantidad y proporción de volumen aserrable en comparación al testigo. La ejecución de un primer raleo comercial aplicado a la edad de 7 años considerando densidades residuales de 700 y 400 arb ha⁻¹ aumenta durante un período de 5 años las tasas de crecimiento del área basal y el DMC. La mayor intensidad del raleo aumenta las tasas de crecimiento de DMC, pero disminuyen las del volumen total. Por otro lado, el efecto de un segundo raleo comercial considerando densidades residuales de 500, 400 y 300 arb ha⁻¹ tras 6 años de la intervención aumenta de la misma forma las tasas de crecimiento tanto en área basal como en DMC respecto al testigo. En este caso, la intensidad del raleo aumenta significativamente el crecimiento del DMC, sin embargo, no tiene un efecto sobre el crecimiento en área basal y volumen total. Finalmente, para todas las intervenciones de raleos analizadas la oportunidad e intensidad no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento y crecimiento de la altura dominante. Demostrándose que este parámetro no es afectado por cambios de densidad de rodal como los aplicados en este estudio.

7. REFERENCIAS

- Álvarez J, Allen HL, Albaugh TJ, Stape JL, Bullock BP y Song C. 2013. Factors Influencing the growth of radiata pine in Chile. *Forestry* 86: 13-26.
- Anning A y McCarthy B. 2013. Competition, size and age affect tree growth response to fuel reduction treatments in mixed-oak forest of Ohio. *Forest Ecology and Management* 307(1): 74-83.
- Bayar E y Deligoz A. 2020. Effects of precommercial thinning on growth parameters in *Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe stand. *Journal of Forestry Research* 31: 1803-1811.
- Bose A, Weiskittel A, Kuehne C, Wagner R, Turnblom, Burkart H. 2018. Tree-level growth and survival following commercial thinning of four major softwood species in North America. *Forest Ecology and Management* 427: 355-364.
- Centro AGRIMED (Agricultura y Medioambiente). 2017. Atlas agroclimático de Chile, estado actual y tendencias del clima, tomo IV: Regiones del BíoBío y de la Araucanía. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 140 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 1999. Estudio Agrológico VIII Región, Descripciones de Suelos, Materiales y Símbolos. Chile. Publicación N° 121. 555 p.
- Cristina A. 2020. Thinning: An Overview. In: Cristina A. eds. *Silviculture*. Évora, Portugal. IntechOpen. p. 1-18.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2023. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2022. Santiago, Chile. 96 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2024. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2023. Santiago, Chile. 94 p.
- Curtis R. 1970. Stand Density Measures: An interpretation. *Forestry Science* 16(4): 403-414.
- de Mendiburu. 2023. *Agricolae*: Statistical procedures for agricultural research. R package versión 1.3-7.
- del Río M, Bravo-Oviedo A, Pretzsch H y Ruz-Peinado R. 2017. A review of thinning effects on Scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. *Forest systems* 26(2): eR03S. 19 p.
- Díaz S, Espinosa M, Valenzuela L, Cancino J y Lasserre J. 2012. Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas, Ciencia y tecnología* 14(3): 373-388.

- Drew DM y Downes GM. 2018. Growth at the microscale: long term thinning effect on patterns and timing of intra-annual stem increment in radiata pine. *Forest Ecosystems* 5 (32).
- Erkan N, Teomen S, Cem Ali. 2023. Thinning effects on stand growth, carbon stock, and soil properties in Brutia pine plantations. *Carbon Balance and management* 18(6). 10 p.
- Espinosa M, García J y Valeria O. 1994. Efecto de intensidades de raleo en el crecimiento de un rodal de Pino radiata. *Bosque* 15(1): 55-65.
- Ferrere P, Lupi AM y Boca T. 2015. Crecimiento del *Pinus radiata* sometido a diferentes tratamientos de raleos y podas en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Bosque* 36(3): 423-434.
- Forrest WG. 1973. Profitability of thinning in radiata pine plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 4(3): 529-539.
- García O. 1990. Growth of Thinned and Pruned Stands. In: James RN y Tarlton GL. New Approaches to Spacing and Thinning in Plantation Forestry: Proceedings of a IUFRO Symposium. Ministry of Forestry. Boletín 151: 84-96.
- Gerding V. 1991. Manejo de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 12(2): 3-10.
- Gutiérrez H y de la Vara R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. 2da edición. The McGraw-Hill. México.
- Güney D, Atar F, Turna İ y Günli A. 2022. Effects of precommercial thinning intensity on growth of *Fagus orientalis* Lipsky stands over 6 years. *Journal of Forestry research*. 33: 937-947.
- Hevia A, Álvarez-González JG y Majada J. 2016. Comparison of pruning effects on tree growth, productivity and dominance of two major timber conifer species. *Forest Ecology and Management* 374: 82-92.
- Hernández V. 1991. Efecto de poda y raleo en el crecimiento de rodales jóvenes de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de Arauco, Los Ángeles y Temuco. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Concepción, Chile. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad de Concepción. 92 p.
- Houtmeyers S y Brunner A. 2022. Individual tree growth responses to coinciding thinning and drought events in mixed stands of Norway spruce and Scots pine. *Forest Ecology and Management*. 522.
- Ojeda H. 2018. Efecto de la intensidad de poda y disponibilidad de recursos hídricos del sitio en el crecimiento de *Pinus radiata* D. Don. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Forestales. Concepción, Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. 111 p.

- Ipinza R. 2010. Hacia el manejo forestal sostenible de los bosques chilenos. Instituto Forestal (INFOR). *Ciencia e Investigación Forestal* 16(3): 381-394.
- Jackson DS, Gifford HH y Graham JD. 1983. Lupin, Fertiliser and Thinning effects on Early Productivity of *Pinus radiata* Growing on Deep Pinaki Sands. *New Zealand Journal of Forestry Science* 13(2): 159-182.
- Maclaren JP. 1993. Radiata Pine Growers's Manual. New Zealand Forest Research Institute. New Zealand. FRI Bulletin No. 184. 125 p.
- Maclaren JP, Grace JC, Kimberly MO, Knowles RL y West GG. 1995. Height growth of *Pinus radiata* as affected by stocking. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 25(1): 73-90.
- Mankiw NG. 2012. Principios de Economía. 6ta edición. Cengage Learning Editores. México. 891 pp.
- Mason E. 2023. Impacts of tending on attributes of radiata pine trees and stand in New Zealand – a review. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 53: 9-23.
- Mead DJ. 2013. Sustainable management of *Pinus radiata* plantations. FAO Forestry Pap. 170, Rome, Italy. 246 p.
- Missanjo E y Kamanga-Thole G. 2015. Effect of first thinning and pruning on the individual growth of *Pinus patula* tree species. *Journal of Forestry Research* 26(4): 827-831.
- Montgomery D. 2013. Design and Analysis of Experiments. Arizona, Estados Unidos. 8va edición, John Wiley & Sons, Inc. 757 p.
- Muñoz F, Espinosa M, Herrera M y Cancino J. 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque* 26(1): 93-99.
- Nilsson U, Agestam E, Ekö PM, Elfving B, Fahlvik N, Johansson U, Karlsson K, Lundmark T, Wallentin C. 2010. Thinning of Scots pine and Norway spruce monocultures in Sweden – effects of different thinning programmes on stand level gross and net stem volume production. *Studia Forestalia Suecia* 219. 46 p.
- Poblete P, Gysling J, Álvarez V, Bañados JC, Kahler C, Pardo E, Soto D y Baeza D. 2023. Anuario Forestal 2023. INFOR (Instituto Forestal, CL). Santiago, Chile. Boletín Estadístico N° 192. 280 p.
- Prodan M, Peters R, Cox F, Real P. 1997. Mensura Forestal. Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica. 586 p.

- Rebottaro y Cabrelli D. 2007. Crecimiento y rendimiento comercial de *Pinus elliotti* en plantación y en regeneración natural manejada con raleos en Entre Ríos, Argentina. *Bosque* 28(2): 152-161.
- Rivera J, Avilés B, Rocuant L y Peña E. 1985. Raleo en bosque de Pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) en arenas de la VIII región. *In: Olivares PB, Morales VE (eds). Pinus radiata. Investigación en Chile.* 222-234.
- Rivera J y Sobarzo G. 1992. Efecto del raleo y poda extrema en plantaciones de Pino radiata. Fundo Jauja, novena región. *In: Olivares PB, Meneses VM y Paredes VG (eds). Pinus radiata. Investigación en Chile. Silvicultura, manejo y tecnología. Valdivia, Chile.* 124-134.
- Rocuant L. 1970. Raleos en un bosque de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) en Cauquenes, Maule. Chillán, Universidad de Concepción. Escuela de Agronomía. Departamento de Suelos. 9 pp.
- Rodríguez R, Sánchez F, Gorgoso J, Castedo F, López C y Gadow K.v. 2002. Evaluating standard treatment options for *Pinus radiata* plantations in Galicia (north-western Spain). *Forestry* 75(3): 273-284.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Sánchez F, Rodríguez R, Rojo A, Álvarez JG, López C, Gorgoso J y Castedo F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación agraria.: Sistemas y Recursos forestales* 12(2): 65 – 83.
- Schlatter JE, y Gerding V. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16(2): 39-56.
- Schickhardt R. 1977. Análisis de varianza de 8 tratamientos de raleo en *Pinus radiata* D. Don. Santiago, Chile: Instituto Forestal (INFOR, CL). 24 p.
- Schickhardt R y García J. 1977. Comparación de tratamientos de raleo. Santiago, Chile: Instituto Forestal (INFOR, CL). 29 p.
- Shepherd KR y Forrest WG. 1973. Growth of Radiata Pine Following Thinning. *Commonwealth Forestry Review* 52(2): 133-142.
- Shepherd KR. 1986. Plantation silviculture. New York. NY. Oxford University Press. 308 p
- Sheskin D. 2000. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. 2da edición Chapman & Hall/CRC. Estados Unidos. 972 p.
- Sutton WRJ y Crowe JB. 1975. Selective pruning of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science* 5(2): 171-195.

- van Laar A. 1969. Influence of tree parameters and stand density on diameter growth of *Pinus radiata*. *South African Forestry Journal* 70(1): 5-14.
- van Laar A. 1979. The response of *Pinus radiata* to Thinning. *South African Forestry Journal* 111(1): 18-23.
- Vega A. 2000. Respuesta de *Pinus radiata* (D. Don) a tres intensidades de raleo en la comuna de Curanilahue, VIII región. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Talca, Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca. 42 pp.
- Vidal F. 2000. Evaluación del efecto de diferentes de poda y raleo en un rodal de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona precordillerana de la IX región. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Talca, Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca. 51 pp.
- Wagle B, Weiskittel A, Kizha A, Berrill JP, D'Amato A y Marshall D. 2022. Long-term influence of commercial thinning on stand structure and yield with/without pre-commercial thinning of spruce-fir in northern Maine. USA. *Forest Ecology and Management* 522.
- West GG. 1998. *Pinus radiata* growth responses to pruning, thinning and nitrogen fertiliser in Kaingaroa Forest. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 28(2): 165-181.
- West PW y Borough CJ. 1983. Tree Suppression and the Self-thinning Rule in a Monoculture of *Pinus radiata* D. Don. *Annals of botany* 52: 149-158.
- Wickham H, François R, Henry L, Müller K y Vaughan D. 2023. Dplyr: A Grammar of Data Manipulations. R package versión 1.1.4.
- Whyte AGD y Woollons RC. 1990. Modelling stand growth of radiata pine thinned to varying densities. *Canadian Journal of Forest Research* 20(7): 1069-1076.
- Woollons RC, Smale PJ, Burgess FF. 1994. Analytical methods to aid interpretation of thinning experiments. *New Zealand Journal of Forestry Science* 24(1): 18-26.

ANEXO 1: Diseño de tratamientos del ensayo Nihuinco.

| Tratamiento | Código | Régimen de raleos | | | Régimen de podas | | |
|-------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|
| | | Raleo Desecho | Raleo Comercial 1 | Raleo Comercial 2 | LCR (m) | Proporción podados (%) | Altura de poda (m) por levante |
| 1 | RD 700 | 4-6 / 700 | - | - | - | - | - |
| 2 | - | 4-6 / 700 | - | 11-15 / 400 | - | - | - |
| 3 | - | 4-6 / 700 | - | 11-15 / 400 | 4 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 4 | RC2 300 | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 300 | 4 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 5 | RC2 400 | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 4 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 6 | RC2 500 | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 500 | 4 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 7 | - | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 4 | 33 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 8 | - | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 4 | 50 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 9 | - | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 4 | 100 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 10 | - | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 5,5 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 11 | - | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | 7 | 75 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| 12 | RC1 700 | - | 7-10 / 700 | 11-15 / 400 | - | - | - |
| 13 | RC1 400 | - | 7-10 / 400 | - | 4 | 50 | 2,2 / 4 / 5,5 |
| Testigo | Testigo | - | - | - | - | - | - |

ANEXO 2: Rendimiento observado post-intervención para el primer y segundo raleo comercial.

Primer Raleo Comercial (7 años)

| Parámetro | Tratamiento | Edad (años) | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| G (m ² ha ⁻¹) | Testigo | 31,9 | 36,3 | 41,0 | 42,8 | 43,5 | 42,5 |
| | RC1 700 | 17,6 | 21,5 | 26,8 | 30,2 | 33,5 | 35,9 |
| | RC1 400 | 9,7 | 12,2 | 16,2 | 19,8 | 23,0 | 25,6 |
| DMC (cm) | Testigo | 17,2 | 18,4 | 19,6 | 20,6 | 21,9 | 23,1 |
| | RC1 700 | 17,9 | 19,9 | 22,2 | 23,7 | 25,0 | 26,0 |
| | RC1 400 | 17,6 | 19,7 | 22,8 | 25,2 | 27,4 | 28,9 |
| H ₁₀₀ (m) | Testigo | 14,8 | 16,4 | 18,8 | 20,4 | 22,9 | 25,0 |
| | RC1 700 | 14,6 | 16,2 | 18,3 | 19,9 | 22,3 | 24,5 |
| | RC1 400 | 14,2 | 16,1 | 18,0 | 19,7 | 21,6 | 23,7 |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹) | Testigo | 183,2 | 229,7 | 295,1 | 330,7 | 375,1 | 403,6 |
| | RC1 700 | 101,0 | 134,8 | 188,4 | 228,6 | 282,7 | 323,3 |
| | RC1 400 | 53,0 | 76,6 | 110,1 | 148,0 | 185,1 | 225,0 |

Segundo Raleo Comercial (12 años)

| Parámetro | Tratamiento | Edad (años) | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| G (m ² ha ⁻¹) | Testigo | 42,5 | 44,2 | 44,0 | 46,2 | 48,4 | 49,9 | 50,9 |
| | RC2 500 | 28,1 | 31,4 | 34,9 | 37,8 | 40,9 | 43,0 | 44,6 |
| | RC2 400 | 23,3 | 26,7 | 29,8 | 32,4 | 35,1 | 36,9 | 37,9 |
| | RC2 300 | 18,0 | 21,2 | 24,3 | 27,6 | 30,7 | 32,9 | 35,3 |
| DMC (cm) | Testigo | 23,1 | 24,2 | 25,3 | 26,3 | 27,4 | 28,2 | 29,5 |
| | RC2 500 | 26,8 | 28,5 | 29,9 | 31,1 | 32,4 | 33,2 | 34,1 |
| | RC2 400 | 27,2 | 29,3 | 30,9 | 32,3 | 33,6 | 34,6 | 35,6 |
| | RC2 300 | 27,8 | 30,1 | 32,5 | 34,6 | 36,5 | 37,8 | 39,1 |
| H ₁₀₀ (m) | Testigo | 25,0 | 26,9 | 29,5 | 31,1 | 32,5 | 33,7 | 36,1 |
| | RC2 500 | 24,2 | 26,3 | 28,3 | 30,0 | 31,1 | 32,9 | 35,4 |
| | RC2 400 | 24,9 | 27,0 | 29,2 | 30,8 | 32,3 | 34,0 | 36,4 |
| | RC2 300 | 24,6 | 26,5 | 28,5 | 30,2 | 31,6 | 33,3 | 36,0 |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹) | Testigo | 403,6 | 450,2 | 479,9 | 524,5 | 567,6 | 606,4 | 667,9 |
| | RC2 500 | 256,6 | 309,1 | 366,0 | 419,8 | 464,4 | 514,4 | 572,1 |
| | RC2 400 | 213,6 | 262,5 | 314,6 | 359,7 | 404,9 | 442,1 | 487,3 |
| | RC2 300 | 164,5 | 207,0 | 251,2 | 299,7 | 345,4 | 389,5 | 448,8 |

ANEXO 3: Comparaciones múltiples del incremento periódico anual post-intervención.

Primer Raleo Comercial (7 años)

| Parámetro | Tratamiento | Años post intervención | | | | |
|---|-------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| G (m ² ha ⁻¹ año ⁻¹) | Testigo | 4,4 ^a | 4,6 ^a | 3,6 ^a | 2,9 ^a | 2,1 ^a |
| | RC1 700 | 3,9 ^a | 4,6 ^a | 4,2 ^b | 4,0 ^b | 3,7 ^b |
| | RC1 400 | 2,5 ^b | 3,2 ^b | 3,4 ^a | 3,3 ^a | 3,2 ^b |
| DMC (cm año ⁻¹) | Testigo | 1,2 ^a | 1,2 ^a | 1,1 ^a | 1,2 ^a | 1,2 ^a |
| | RC1 700 | 1,9 ^b | 2,1 ^b | 1,9 ^b | 1,8 ^b | 1,6 ^b |
| | RC1 400 | 2,1 ^c | 2,6 ^c | 2,5 ^c | 2,4 ^c | 2,3 ^c |
| H ₁₀₀ (m año ⁻¹) | Testigo | 1,5 ^a | 2,0 ^a | 1,9 ^a | 2,0 ^a | 2,0 ^a |
| | RC1 700 | 1,6 ^a | 1,9 ^a | 1,8 ^a | 1,9 ^a | 2,0 ^a |
| | RC1 400 | 1,9 ^a | 1,9 ^a | 1,8 ^a | 1,9 ^a | 1,9 ^a |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹ año ⁻¹) | Testigo | 46,5 ^a | 56,0 ^a | 49,2 ^a | 48,0 ^a | 44,1 ^a |
| | RC1 700 | 33,8 ^b | 43,7 ^b | 42,5 ^b | 45,4 ^a | 44,5 ^a |
| | RC1 400 | 23,6 ^c | 28,6 ^c | 31,7 ^c | 33,0 ^b | 34,4 ^b |

Segundo Raleo Comercial (12 años)

| Parámetro | Tratamiento | Años post intervención | | | | | |
|---|-------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| G (m ² ha ⁻¹ año ⁻¹) | Testigo | 1,7 ^a | 0,8 ^a | 1,2 ^a | 1,5 ^a | 1,5 ^a | 1,4 ^a |
| | RC2 500 | 3,3 ^{ab} | 3,4 ^b | 3,2 ^b | 3,2 ^b | 3,0 ^b | 2,8 ^b |
| | RC2 400 | 3,5 ^b | 3,3 ^b | 3,1 ^b | 2,9 ^b | 2,7 ^b | 2,4 ^b |
| | RC2 300 | 3,2 ^{ab} | 3,2 ^b | 3,2 ^b | 3,2 ^b | 3,0 ^b | 2,9 ^b |
| DMC (cm año ⁻¹) | Testigo | 1,1 ^a | 1,1 ^a | 1,0 ^a | 1,1 ^a | 1,0 ^a | 1,1 ^a |
| | RC2 500 | 1,6 ^b | 1,5 ^b | 1,4 ^b | 1,4 ^b | 1,3 ^{ab} | 1,2 ^{ab} |
| | RC2 400 | 2,1 ^{bc} | 1,9 ^b | 1,7 ^b | 1,6 ^b | 1,5 ^b | 1,4 ^b |
| | RC2 300 | 2,4 ^c | 2,4 ^c | 2,3 ^c | 2,2 ^c | 2,0 ^c | 1,9 ^c |
| H ₁₀₀ (m año ⁻¹) | Testigo | 1,9 ^a | 2,3 ^a | 2,0 ^a | 1,9 ^a | 1,8 ^a | 1,9 ^a |
| | RC2 500 | 2,2 ^a | 2,1 ^a | 1,9 ^a | 1,7 ^a | 1,7 ^a | 1,9 ^a |
| | RC2 400 | 2,2 ^a | 2,1 ^a | 2,0 ^a | 1,9 ^a | 1,8 ^a | 1,9 ^a |
| | RC2 300 | 1,8 ^a | 1,9 ^a | 1,8 ^a | 1,7 ^a | 1,7 ^a | 1,9 ^a |
| VT (m ³ ssc ha ⁻¹ año ⁻¹) | Testigo | 46,6 ^a | 38,2 ^a | 40,3 ^a | 41,0 ^a | 40,6 ^a | 44,1 ^a |
| | RC2 500 | 52,4 ^a | 54,7 ^b | 54,4 ^b | 51,9 ^b | 51,5 ^b | 52,6 ^a |
| | RC2 400 | 48,9 ^a | 50,5 ^{bc} | 48,7 ^{bc} | 47,8 ^{ab} | 45,7 ^{ab} | 45,6 ^a |
| | RC2 300 | 42,5 ^a | 43,3 ^{ac} | 45,0 ^{ac} | 45,2 ^{ab} | 45,0 ^{ab} | 47,4 ^a |