



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Evaluación del crecimiento luego de 6 años de la aplicación de tratamientos silviculturales en un bosque adulto degradado en Pumillahue

Patrocinante: Sr. Pablo Donoso H.

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

RAYEN AYLIN NEIRA ZÚÑIGA

VALDIVIA

2025

	Índice de materias	Página
i.	Calificación del Comité de Titulación	i
ii.	Agradecimientos	ii
iii.	Resumen	iii
1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	MÉTODOS	9
2.1.	Área de estudio	9
2.2.	Bosque evaluado	10
2.3.	Descripción de los tratamientos de rehabilitación	11
2.4.	Variables del rodal antes y después de los tratamientos silviculturales	12
2.5.	Diseño experimental	14
2.6.	Evaluaciones y muestreo	14
2.7.	Procesamiento y análisis de datos	15
2.8.	Análisis estadísticos	19
3.	RESULTADOS	20
3.1.	Distribución diamétrica	20
3.2.	Crecimiento a nivel de rodal para el período 2015-2021	20
3.3.	Crecimiento para el periodo 2015 y 2021	21
3.4.	Incremento periódico anual en diámetro, área basal y volumen por tratamientos	22
3.5.	Incremento periódico anual en diámetro, área basal y volumen, por especie y tratamiento	24
3.6.	Mortalidad	27
3.7.	Reclutamiento	30
3.8.	Incrementos anuales en área basal y volumen por tratamiento	32
4.	DISCUSIÓN	33
4.1.	Efecto de los tratamientos en el crecimiento, área basal y volumen	33
4.1.1.	Análisis a nivel de rodal y tratamiento	33
4.1.2.	Análisis por rangos de clases diamétricas	34
4.1.3.	Análisis por especies con mayor valor de importancia	35
4.2.	Efecto de los tratamientos silviculturales en la mortalidad y reclutamiento	37
4.2.1.	Mortalidad	37
4.2.2.	Reclutamiento	38
4.3.	Efecto de los tratamientos en el incremento neto y bruto en área basal y volumen	38
5.	CONCLUSIONES	39
6.	REFERENCIAS	40
Anexos	1. Criterios para evaluar sanidad, forma y copa	43
	2. Variables dasométricas promedio y desviación estándar por especie y tratamiento en los años 2015 y 2021	44

Calificación del comité de titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Pablo Donoso Hiriart	<u>6,1</u>
Informante: Sra. Angélica Vásquez Grandón	<u>5,7</u>
Informante: Sr. Diego Ponce	<u>6,2</u>

El patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento 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.



Sr. Pablo Donoso H.

AGRADECIMIENTOS

A mis sobrinos, por la motivación y vitalidad que me entregaron en este proceso sin que ellos supieran, por su amor incondicional a pesar de la distancia.

A mi madre, hermana y padre, por el sacrificio de todos estos años, por sostenerme y guiarme en este camino a pesar de las dificultades.

A mis amistades, que se convirtieron en mi segunda familia, momentos que cambiaron de manera positiva mi vida, el apoyo en todo momento para que no dejara de creer en que si puedo y en enseñarme a ser mejor persona.

Heidi Böttcher, Lucía Mondaca, Paula Guzmán, Catu, Carla Sánchez y Valentina Rojas por ser un hogar en Valdivia.

Leandro Chaura y Carlos Luco por su tiempo, compañía, cariño y apoyo incondicional en este proceso, sin ustedes hubiera sido muy difícil avanzar y aprender

A mi comisión, profesor Pablo Donoso por hacerme parte del laboratorio de silvicultura y contagiar la motivación de manejar e investigar sobre los bosques nativos, Angélica Vásquez por su tiempo y disposición a enseñarme y guiarme en este proceso, y ser una referente, Diego Ponce por ser parte de mi comisión y buenas vibras.

A la revolución pingüina, por luchar por una educación gratuita y de calidad, sin la gratuidad esto no habría sido posible para mí.

Y, por último, pero no menos importante, a mí, por la resiliencia, perseverancia y la fuerza natural que hay en mí de salir de la zona de confort.

RESUMEN

Los bosques degradados del sur de Chile se caracterizan por una escasa o nula regeneración natural, pérdida de estratos y alteración de procesos ecológicos, lo que hace urgente su rehabilitación mediante herramientas silviculturales adecuadas. Este estudio evaluó, seis años después de su implementación, el efecto de distintos tratamientos de rehabilitación: (1) corta de mejoramiento, (2) control de sotobosque y (3) escarificación del suelo. Para ello, se establecieron cuatro parcelas permanentes de 2000 m², cada una dividida en cuatro subparcelas de 500 m², en las cuales se aplicaron los tratamientos de forma combinada. Una subparcela se mantuvo como testigo; otra recibió sólo el tratamiento (1); una tercera combinó los tratamientos (1) y (2); y la última aplicó los tres tratamientos (1), (2) y (3). El análisis se basó en principios de dinámica de bosques multietáneos, tolerancia a la sombra y respuesta en incrementos de diámetro, área basal y volumen post intervenciones. Los resultados mostraron que la corta de mejoramiento generó el mayor crecimiento neto a nivel de rodal, con incrementos anuales de 10 árboles/ha en densidad, 0,83 m²/ha en área basal y 7,9 m³/ha en volumen, junto con mayor reclutamiento y bajos niveles de mortalidad en densidad. El reclutamiento estuvo dominado por especies tolerantes y semitolerantes a la sombra. En cambio, el tratamiento más intensivo mostró un menor incremento en el reclutamiento. Se concluyó que tratamientos de baja intensidad como la corta de mejoramiento son efectivos para iniciar la rehabilitación de rodales degradados en estas condiciones, sin necesidad de aplicar intervenciones más costosas e invasivas. Estos hallazgos entregaron evidencia técnica para orientar estrategias silviculturales de bajo impacto y alta eficiencia con proyecciones aplicables a programas de restauración ecológica y manejo sustentable de bosques nativos.

Palabras claves: degradación de bosques, cortas de mejoramiento, silvicultura, variables demográficas

1 INTRODUCCIÓN

La degradación de los bosques es un problema de gran relevancia a nivel mundial; que debe ser abordado con urgencia (Vergara y Schlegel 2017). Un bosque degradado fue un bosque primario, donde su cobertura inicial ha sido afectada por la explotación insostenible de madera y/o de productos no maderables, de manera que se ha alterado su estructura, procesos, funciones y dinámica, viéndose afectada la capacidad del bosque de recuperarse naturalmente a corto plazo luego de la explotación, debido a que sus procesos y funciones se ven muy limitados (ITTO 2002, FAO 2010).

Los bosques degradados proporcionan un nivel reducido de productos y servicios de un sitio determinado y mantienen una diversidad biológica limitada (ITTO 2002), debido a que presentan una disminución en la capacidad de proveer bienes y servicios ecosistémicos (Vargas y Bustamante 2007). Los bosques degradados tienen efectos negativos en los ámbitos económico, ambiental y social (Vergara y Schlegel 2017), y ello que es preocupante, especialmente para numerosas comunidades, cuyas culturas y medios de sustento están estrechamente relacionadas al bosque (ITTO 2002). En este sentido, se ha analizado la relación entre el nivel de ingreso monetario y la degradación, resultando que, las regiones que registran una mayor degradación presentan un alto porcentaje de la población con ingresos por debajo de la línea de pobreza (Bannister et al. 2024).

Si bien no existe un consenso sobre una definición única y precisa de lo que constituye un bosque degradado, sin embargo, se han identificado a nivel global los principales disturbios antrópicos que determinan la degradación forestal, siendo principalmente la extracción no sustentable de madera, recolección de leña, la producción de carbón, los incendios forestales y el pastoreo de ganado (Hosonuma et al. 2012, Kissinger et al. 2012).

En Chile, una de las causas de degradación de los bosques es la práctica recurrente llamada “floreo”, que consiste en la extracción indiscriminada de los mejores individuos arbóreos, provocando la disminución de especies maderables de alto valor, afectando negativamente la estructura y composición del bosque, y también afectando la sanidad, calidad y regeneración natural, este último siendo consecuencia por el aumento de especies competidoras e invasoras (Mujica 2008, Vásquez-Grandón et al. 2018).

Las consecuencias ambientales de los disturbios antropogénicos frecuentes e intensos pueden comprometer la capacidad de recuperación de los bosques, dado que alteran los procesos ecológicos esenciales, pudiendo llevar a estados de sucesión detenida. Es decir, los bosques degradados pierden su

resiliencia, entendida como la capacidad de un ecosistema a regresar a su estado estable antes a la perturbación (ITTO, 2002, Ghazoul et al 2015).

Los ecosistemas forestales degradados tienen sus propios umbrales de resistencia y resiliencia, existe una alta probabilidad de que presenten una alta resistencia a los tratamientos de restauración o una alta resiliencia para volver hacia un estado degradado, limitando las acciones de restauración (Lake, 2013). Esta situación cobra especial relevancia; frente al cambio climático, donde se espera un aumento en la frecuencia de eventos extremos y un mayor déficit hídrico, representando una perturbación climática severa y prolongada, con posibles efectos irreversibles, no solo sobre el crecimiento de los bosques, sino que también haciéndolos más vulnerables a agentes nocivos (Weigandt et al. 2019).

Frente a este escenario, teniendo en cuenta las consecuencias la degradación de los bosques, se puede optar por estrategias que pretendan llevar el ecosistema degradado a uno menos degradado (Bannister et al 2024), siendo una de ellas la restauración ecológica o la rehabilitación de bosques, la rehabilitación de bosques tiene como propósito llegar a estadios de mayor complejidad, pero no necesariamente al supuesto estado histórico previo a la perturbación del ecosistema (Bannister et al 2016). Mientras que la restauración ecológica tiene como objetivo recuperar las características históricas del ecosistema previo a la alteración (Stanturf et al. 2014).

La silvicultura es una herramienta fundamental para la restauración de los bosques, abarcando desde técnicas eficientes de plantación hasta procesos más complejos, como la restauración de bosques degradados (O'Hara 2001, Bannister et al. 2016). Se define como la teoría y la práctica de gestionar el establecimiento, composición, características y el crecimiento de los bosques con el fin de alcanzar objetivos específicos, además, forma parte del manejo forestal, permitiendo regular la estructura, densidad y composición de un rodal (Nyland 2016). Por esta razón, la silvicultura para la restauración de bosques busca superar la alta resistencia y resiliencia que presenta un bosque degradado mediante intervenciones que promuevan un ecosistema capaz de mantener sus procesos ecológicos, su estructura y composición frente a variaciones ambientales adaptándose a condiciones climáticas cambiantes (Thompson et al 2009).

En la literatura se proponen diversos manejos para bosques degradados, los que generalmente están orientados en mejorar las condiciones de regeneración, a través de la reducción del área basal, eliminando los individuos de baja calidad, dañados, afectados por plagas y bajo valor comercial (Quirós 2001). Esto no solo favorece el crecimiento de la regeneración, sino también el crecimiento de los árboles remanentes y el reclutamiento, debido a que los tratamientos están dirigidos a incrementar las existencias de especies valiosas (Molina et al. 2017). También se realizan actividades de enriquecimiento, lo que

conlleve plantar especies bajo dosel, y se debe tener en cuenta que la genética de las plantas corresponda a la zona (Muñoz et al. 2018).

Para transformar gradualmente un bosque con un ecosistema simple a uno más complejo donde aún hay suficientes árboles vigorosos y una cobertura tal que mantiene un ambiente de bosque, se puede orientar a través de los sistemas silviculturales que estén enfocados principalmente en: a) favorecer el crecimiento y abundancia de especies de interés, b) estimular la regeneración natural y el crecimiento de las especies de interés en el sotobosque a través de la remoción de árboles del dosel, y c) manejo del sotobosque, con el objetivo de reducir la competencia entre las especies de interés y favorecer su incremento (Serrano-Molina et al. 2021).

En el año 2015 Donoso *et al.* (2018a) realizaron un proyecto en Pumillahue para desarrollar estrategias y técnicas eficientes para la rehabilitación de bosques adultos degradados en el centro-sur de Chile, estableciendo un ensayo donde se probaron distintos tratamientos conducentes a recuperar bosques degradados mediante regeneración natural y plantaciones suplementarias, donde evaluaron luego de dos temporadas de crecimiento, los efectos tempranos de estos tratamientos silviculturales, obteniendo solo resultados en relación a la regeneración naturales. Posteriormente, Jackson (2022) realizó una nueva evaluación para estudiar los efectos de los distintos tratamientos en la regeneración, confirmando que al aplicar técnicas de rehabilitación en un bosque adulto degradado del tipo forestal siempreverde aumenta la densidad de la regeneración natural de especies arbóreas.

A partir de los antecedentes surge la necesidad de evaluar si los tratamientos de rehabilitación aplicados en bosques degradados generan efectos no solo sobre la regeneración, cuyo impacto ya ha sido comprobado, sino también sobre el crecimiento de los árboles remanentes, así como en la mortalidad y reclutamiento, aspectos que hasta ahora no han sido suficientemente estudiados, aunque estos tratamientos están orientados principalmente a estimular la regeneración natural del rodal, se desconoce en qué medida podrían influir en las variables demográficas (crecimiento, reclutamiento y mortalidad de árboles) del bosque.

Una de las limitantes de este trabajo es la escasa posibilidad de comparar sus resultados con otros estudios realizados donde se hubieran aplicado tratamientos de rehabilitación para recuperar bosques degradados en Chile.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes tratamientos silviculturales de rehabilitación, a través de variables demográficas (crecimiento, reclutamiento y mortalidad de árboles) luego de seis años de su aplicación en un bosque degradado del tipo forestal RORACO, del sector de Pumillahue.

Objetivos específicos

- Cuantificar el crecimiento, área basal y volumen en cada tratamiento, tanto a nivel de rodal como por rangos de clases diamétricas y en las especies con mayor valor de importancia en el rodal.
- Comparar la mortalidad y reclutamiento entre los tratamientos silviculturales aplicados.
- Evaluar el efecto de los tratamientos en el incremento anual neto y bruto en área basal y volumen.

2 MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el predio Pumillahue, administrado por CONAF (Corporación Nacional Forestal) latitud 39°38'20" S y longitud 72°45'01" W (Soto et al. 2020), ubicado en la depresión intermedia, en la comuna de San José de la Mariquina, en la región de Los Ríos, Chile (figura 1). Posee una superficie total de 686,9 ha, de las cuales, 346,6 ha son de bosques nativos, 7,6 ha fajas de caminos, 83,8 ha superficie de protección, 236,5 ha plantaciones forestales, y 9,4 ha corresponden a otros usos (Barros et al., 2022). Este predio se encuentra a una altitud de 260 m s.n.m (Soto et al. 2020).

El bosque evaluado pertenece al tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, siendo el subtipo bosques degradados (Donoso 1981). Este subtipo se podría desarrollar a partir de una extracción moderada, donde quedó un alto porcentaje de cobertura en el dosel, donde las especies intolerantes no son capaces de establecerse, en cambio, se establecen numerosos individuos de especies tolerantes, particularmente Olivillo, Laurel, Tepa, Lingue, en ocasiones Mañío de hojas largas (Novoa 1980).

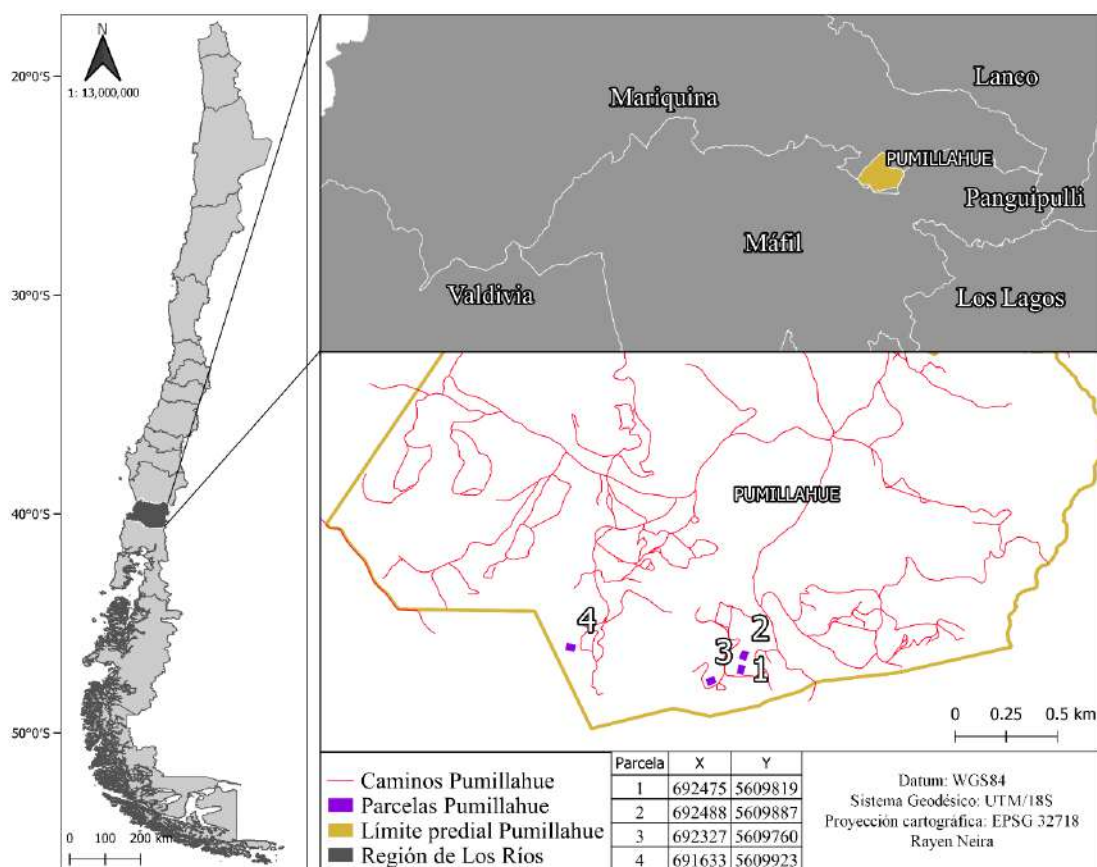


Figura 1. Área de estudio en el predio Pumillahue. Elaboración propia.

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger el clima corresponde a templado lluvioso con leve sequedad estival (IDE Chile), donde la precipitación media es 1.915 mm, la temperatura media del periodo estival 16°C y la temperatura media del periodo invernal 7,4°C (MMA 2016).

El suelo es del orden Ultisol y pertenece a la serie Correltue, los que se caracterizan por tener una textura franco-limosa y color rojo oscuro, profundos, desarrollados a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la cordillera de La Costa. Sobre las variaciones de la serie Correltue, el área de estudio pertenece a CTE – 1, la cual corresponde a topografía de cerros con 30 a 50% de pendientes, bien drenados, con una capacidad de uso VIIe1 (CIREN 2003).

2.2 Bosque evaluado

La condición inicial del rodal (previo a las intervenciones) era un bosque con un nivel alto de degradación según Vásquez-Grandón (2018), y caracterizado por tener una estructura cuantitativa alterada por la extracción mediante floreo de las especies arbóreas comerciales como por ejemplo *Nothofagus obliqua*, *Nothofagus alpina* y *Nothofagus dombeyi*, con presencia de individuos con fustes

de diámetros a la altura del pecho de >100 cm, con aporte significativo al área basal total. Debido al denso estrato inferior y a la alta cobertura de especies competidoras (35%), la densidad total de la regeneración arbórea era baja (15.179 individuos/ha).

Respecto a este rodal, Donoso *et al.* (2018a) señalan además en el área de estudio, se obtuvo un valor de 65 a 80 m²/ha en área basal, la que estaba concentrada principalmente en especies comerciales (*Aextoxicon punctatum*, *Eucryphia cordifolia*, *Laureliopsis philippiana*, *Laurelia sempervirens*, *Podocarpus saligna*, *Nothofagus obliqua* *Weinmannia trichosperma* y *Persea lingue*) de fustes delgados (DAP < 35 cm), fustes medios (DAP [$> 35, \leq 65$] cm) y árboles sobre maduros que son parte del bosque residual de fustes muy gruesos (DAP > 100 cm).

2.3 Descripción de los tratamientos de rehabilitación

En el año 2015 se establecieron y manejaron 4 parcelas permanentes, en el contexto de un proyecto FIBN 005/2014 realizado por Donoso *et al.* (2018a), donde se aplicaron distintas técnicas para la rehabilitación de bosques degradados: corta de mejoramiento, control del sotobosque y escarificado del suelo (Cuadro 1).

La corta de mejoramiento consistió en la corta de los árboles categorizados como de calidad silvícola 3, cuyas principales características eran tener un estado sanitario regular con porciones del fuste con problemas de sanidad o árboles con fuste mayoritariamente afectado por daño sanitario y fustes parcialmente sinuosos sobre primera troza o muy sinuosos. Adicionalmente, y en función de homogeneizar la distribución de la luz en el sotobosque, se extrajeron individuos de especies secundarias y arborescentes.

El caso del control de sotobosque, se redujo significativamente la densidad o cobertura principalmente de las especies arbustivas, para aumentar la supervivencia de la regeneración arbórea, esto implicó cortar principalmente *Chusquea quila* y *Greigia sphacelata*.

Finalmente, el escarificado implicó la manual remoción de la hojarasca para dejar una superficie de suelo mineral despejada donde se favorece la regeneración natural especialmente de especies de semillas livianas.

Se debe destacar que los diferentes tratamientos tuvieron como objetivo principal mejorar las condiciones de regeneración en el rodal.

Cuadro 1. Tipos de tratamientos silviculturales y sus características.

Tratamiento	Descripción y actividades
1. Control	Sin tratamientos
2. Corta de mejoramiento	Corta de árboles de menor calidad, bajo diámetro. Con el objetivo de homogenizar la penetración de luz en el sotobosque
3. Corta de mejoramiento y control del sotobosque	Al igual que en el tratamiento 2, se incluye el control manual de sotobosque. Con el objetivo de evitar la competencia de plántulas
4. Corta de mejoramiento, control del sotobosque y escarificación del suelo	Al igual que en el tratamiento 3, se realizó escarificación manual en la capa superior del suelo. Con el objetivo de eliminar la hojarasca

Fuente: Modificado de Donoso et al. (2018a).

2.4 Variables del rodal antes y después de los tratamientos silviculturales

Previo a los tratamientos para la rehabilitación, la clase diamétrica de 5 (cm) tenía una densidad inicial de 400 árboles por hectárea. Posterior a la aplicación de los tratamientos, disminuyó a 250 árboles por hectárea, siendo la clase diamétrica donde se realizó una mayor intervención. Los tratamientos se realizaron principalmente en las clases diamétricas inferiores ($DAP < 30$ cm), manteniendo la estructura multietánea.

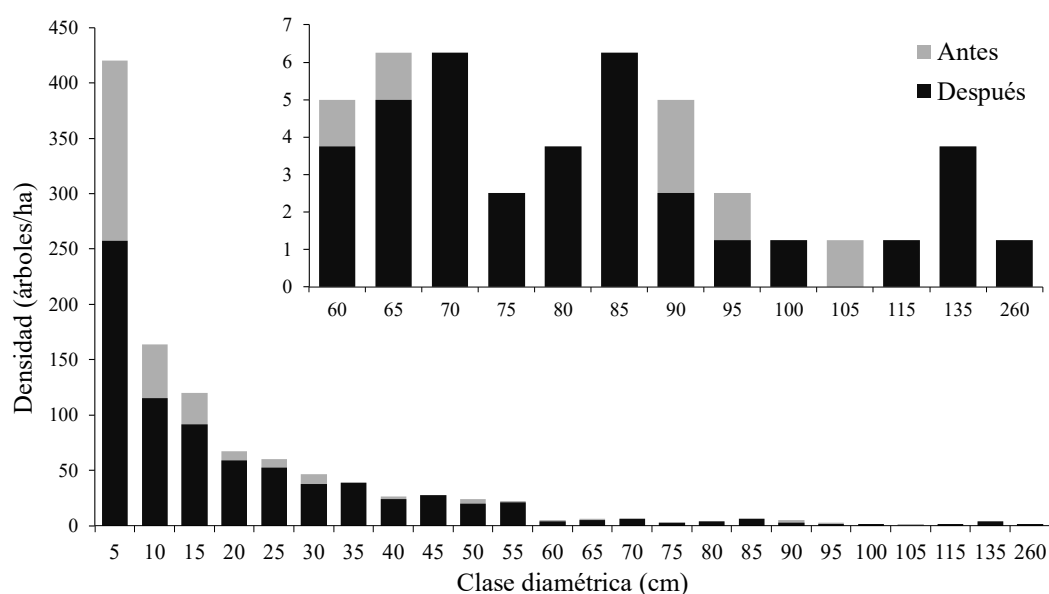


Figura 2. Distribución diamétrica antes y después de la aplicación de tratamientos silviculturales.

A nivel de rodal, la densidad total de individuos se redujo en un 26% aproximadamente, (Cuadro 2). La clase diamétrica entre 5-10 cm tuvo una mayor disminución en su densidad y la clase diamétrica >70 cm, tuvo mayor disminución en área basal y volumen.

Cuadro 2. Variables dasométricas promedio del rodal antes y después de la aplicación de tratamientos de rehabilitación.

Condición inicial					
Clase diamétrica	Densidad (árboles/ha)	DMC (cm)	Altura total (m)	Área basal (m ² /ha)	Volumen (m ³ /ha)
5-10	420	7,1	8,4	1,7	7,8
10-20	284	14,5	13,1	4,7	32,3
20-40	213	29,0	19,7	14,0	122,6
40-70	111	51,5	24,2	23,2	212,7
>70	35	105,0	28,7	30,3	323,6
Total	1063	41,4	18,8	73,9	699,0
Post tratamientos					
Clase diamétrica	Densidad (árboles/ha)	DMC (cm)	Altura total (m)	Área basal (m ² /ha)	Volumen (m ³ /ha)
5-10	258	7,2	8,5	1,1	5,0
10-20	206	14,7	13,3	3,5	23,1
20-40	188	29,2	19,7	12,6	109,2
40-70	101	51,3	24,1	20,9	189,2
>70	30	106,1	28,3	26,5	275,6
Total	783	41,7	18,8	64,6	602,1

Fuente: Modificado de Donoso *et al.* (2018a).

Cuadro 3. Variables dasométricas promedio por cada tratamiento antes y después de aplicar el manejo.

Tratamiento	Densidad inicial (árboles/ha)	Densidad final (árboles/ha)	Extracción (árboles/ha)	Área basal inicial (m ² /ha)	Área basal final (m ² /ha)	Extracción (m ² /ha)	Volumen inicial (m ³ /ha)	Volumen final (m ³ /ha)	Extracción (m ³ /ha)
T1	1275	1275	0	101,9	101,9	0,0	1004,6	1004,6	0,0
T2	1015	690	325	79,7	67,8	11,8	699,2	595,4	103,8
T3	1150	720	430	63,7	48,8	15,0	589,4	426,1	163,4
T4	810	460	350	50,3	39,8	10,4	502,9	382,7	120,2

T1: control. T2: corta de mejoramiento. T3: corta de mejoramiento, control de sotobosque. T4: corta de mejoramiento, control de y escarificado. Fuente: Modificado de Donoso *et al.* (2018a).

2.5 Diseño experimental

Se evaluaron 4 parcelas (Cuadro 4) permanentes de forma rectangular de 2.000 m² cada una (50x40 m) establecidas por Donoso *et al.* (2018a), quienes aplicaron un diseño anidado, donde se dividió cada parcela en cuatro cuadrantes del mismo tamaño, de 500 m².

Los tratamientos se asignaron aleatoriamente en los cuatro cuadrantes de cada parcela permanente, sin embargo, el cuadrante con mayor área basal se asignó como cuadrante control, donde no se realizaron intervenciones para comparar la respuesta de los demás tratamientos.

Cuadro 4. Asignación en la aplicación de técnicas de rehabilitación en Pumillahue. T1: Testigo (sin intervención), T2: corta de mejoramiento, T3: corta de mejoramiento y control de sotobosque, T4: corta de mejoramiento, control del sotobosque y escarificado del suelo.

Cuadrante	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
1	T2	T3	T1	T3
2	T3	T4	T4	T4
3	T4	T1	T3	T2
4	T1	T2	T2	T1

Fuente: Donoso *et al.* (2018a).

Se analizó la estructura de los rodales de bosques nativos adultos degradados en cada cuadrante, mediante la medición de parámetros cuantitativos y una evaluación cualitativa de los doseles arbóreo y arbustivo.

2.6 Evaluaciones y muestreo

Luego de seis años de realizar los tratamientos, se visitó el rodal en el año 2021 con el objetivo de remedir todos los individuos marcados al momento de establecer la parcela en el año 2015. Además,

se identificaron los individuos muertos y el reclutamiento de nuevos individuos arbóreos (DAP mayor a 5 cm) entre el año 2015 y 2021, donde registró su especie, DAP, sanidad y forma.

Para obtener los parámetros cuantitativos y cualitativos del rodal, se midieron todos los árboles desde 5 cm en su diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (m), altura de comienzo de copa (m), sanidad, forma y forma de la copa (Anexo 1) y posición sociológica (suprimido, intermedio, codominante y dominante).

2.7 Procesamiento y análisis de datos

Se determinaron las variables dasométricas para cada especie: densidad (árboles/ha), área basal (m²/ha), diámetro medio cuadrático (cm) [1] y valor de importancia [2] para obtener las especies con mayor dominancia en la estructura del bosque.

$$DMC_i = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}} \quad [1]$$

Donde:

G = área basal total de la especie i ;

N = número total de individuos de la especie i .

$$VI(\%) = \frac{\frac{ni}{N} * 100 + \left(\frac{ABni}{ABN}\right) * 100}{2} \quad [2]$$

Donde:

ni = número de individuos de la especie i ;

N = número total de individuos;

$ABni$ = área basal de ni ;

ABN = área basal de N .

Con los registros de DAP en diferentes años (2015 y 2021) se determinó el incremento periódico anual (IPA) [3] en diámetro a nivel de árbol individual y según 5 rangos diamétricos (5 - 10 cm; >10 –

20 cm; >20 – 40 cm; >40 – 70 cm y > 90 cm) para cada árbol vivo, así mismo se calculó el IPA en área basal y volumen.

$$IPAy = \frac{Y_1 - Y_0}{t_1 - t_0} \quad [3]$$

Donde:

Y_1 = Valor de la variable en el año final del periodo;

Y_0 = Valor de la variable en el año inicial del periodo;

t_1 = año de periodo final;

t_0 = año de periodo inicial.

Se calculó en incremento neto anual [4] y bruto [5] del rodal para cada tratamiento, para las variables de estado como área basal y volumen. Para obtener el incremento neto, se consideró solo aquellos árboles que permanecieron vivos entre el año inicial y final del periodo, y excluyendo las pérdidas por extracciones y mortalidad, y ganancias por reclutamiento. En el incremento bruto se incorporó el incremento neto, la mortalidad y el reclutamiento. Para ello se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$IN_x = \frac{X_1 - X_0}{t_1 - t_0} \quad [4]$$

$$IB_x = \frac{IN_x + M_x + R_x}{t_1 - t_0} \quad [5]$$

Donde:

IN_x = Incremento periódico anual neto de la variable de estado X;

X_t = Variable de estado X en el año final del periodo de análisis (excluyendo R_x);

X_0 = Variable de estado X en el año inicial del periodo de análisis;

t_1 = año final del periodo;

t_0 = año inicial del periodo;

IB_x = Incremento periódico anual bruto de la variable de estado X;

M_x = Disminución bruta de la variable X durante el periodo de análisis, producto de la mortalidad natural;

R_x = Variable X de los nuevos árboles reclutados.

Para obtener la altura total de los individuos, se seleccionó una muestra de altura total de los individuos medidos el año 2015 según especie. Para ello se emplearon dos modelos lineales altura-diámetro, propuesto por Michailoff (1943) [6], y recopilados por Salas et al. (2018) [7]. La evaluación de los modelos se realizó mediante el software Rstudio, se seleccionó el modelo que presentó mayor coeficiente de determinación para cada especie (Cuadro 5).

$$\log(h_i) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{d_i} + \varepsilon_i; \quad [6]$$

Donde:

$\log(h_i)$ = logaritmo de altura total para el i-ésimo árbol;

β_0, β_1 = parámetros a ser estimados;

d_i = diámetro a la altura del pecho, para el i-ésimo árbol;

ε_i = error aleatorio del modelo asociado al i-ésimo árbol.

$$h_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \varepsilon_i; \quad [7]$$

Donde:

h_i = altura total para el i-ésimo árbol;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = parámetros a ser estimados;

d_i^2 = diámetro a la altura del pecho, para el i-ésimo árbol;

ε_i = error aleatorio del modelo asociado al i-ésimo árbol.

Posteriormente, para estimar el incremento en volumen, se estimó el volumen a nivel de cada individuo, según especie, en base a las funciones de volumen extraídas del compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo desarrollado por Drake et al. (2003) (Cuadro 6).

Cuadro 5. Parámetros, coeficiente de determinación y número de muestras por especie para los modelos de altura-diámetro.

Especie	Parámetros			R2 (%)	n
	β_0	β_1	β_2		
<i>A. punctatum</i>	3,847	-4,717	-	64	273
<i>A. chilensis</i>	-20,170	7,1077	-0,4452	99	7
<i>A. luma</i> y <i>L. apiculata</i>	9,1112	-1,5515	0,1672	76	10
<i>E. cordifolia</i>	3,780	-4,384	-	65	68
<i>G. avellana</i>	5,825343	0,629537	-0,005782	37	101
<i>L. sempervirens</i>	4,912709	0,628044	-0,003238	90	50
<i>L. philippiana</i>	4,260617	0,797272	-0,005323	75	141
<i>L. dentata</i>	2,35808	0,90301	-0,01872	33	81
<i>L. ferruginea</i> y <i>R. spinosus</i>	-3,8776	2,8806	-0,1699	54	13
<i>N. obliqua</i>	3,641	-16,248	-	61	7
<i>P. lingue</i>	3,162	-6,087	-	64	6
<i>P. saligna</i>	2,115960	0,793231	-0,009809	80	28
<i>W. trichosperma</i>	-721,2582	20,8211	-0,1402	82	4

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Funciones empleadas para la estimación del volumen por especie.

Especie	Función de volumen
<i>A. punctatum</i>	$0,000018 * (d^2 \cdot H) + 0,000243 * d^2$
<i>A. luma</i>	$0,000028 * (d^2 \cdot H) + 7,0473 * 10^{-10} * (d^2 \cdot H)^2 - 2,583 * 10^{-14} * (d^2 \cdot H^2)$
<i>A. chilensis</i>	$EXP(-7,79199 + 2,0737 * \ln(d))$
<i>E. cordifolia</i>	$0,000019 * (d^2 \cdot H) + 0,000191 * d^2$
<i>G. avellana</i>	$0,00004057 * (d^2 \cdot H) + 0,00009389 * d^2$
<i>L. sempervirens</i>	$0,000025 * (d^2 \cdot H)$
<i>L. philippiana</i>	$0,000024 * (d^2 \cdot H) + 0,000152 * d^2$
<i>L. dentata</i>	$0,000025 * (d^2 \cdot H)$
<i>L. ferruginea</i>	$0,000025 * (d^2 \cdot H)$
<i>L. apiculata</i>	$0,000025 * (d^2 \cdot H) + 1,4085 * 10^{-10} * ((d^2 \cdot H^2) * 1,28933 * 10^{-15} * (d^2 \cdot H)^3$
<i>N. obliqua</i>	$-0,03695309 + 0,00075407 * d^2$
<i>P. lingue</i>	$(\frac{d}{100})^2 * 4,1675 + 0,1303 * (-6,3217 + 0,8706 * H)$
<i>P. saligna</i>	$0,00004375 * (d^2 \cdot H) + 0,00009836 * d^2$
<i>R. spinosus</i>	$0,000025 * (d^2 \cdot H)$
<i>W. trichosperma</i>	$0,000038 * (d^2 \cdot H) - 1,07637 * 10^{-10} * (d^2 \cdot H)^2$

Fuente: Drake *et al.* (2003).

2.8 Análisis estadísticos

Las parcelas y los cuadrantes fueron establecidos mediante el diseño en bloques completos al azar, el cual permite estudiar el efecto de un factor de interés (en este caso, los tratamientos), a pesar de que existan otros factores que se incorporen de manera explícita (Gutiérrez y De La Vara. 2018). De este modo, se busca que cada medición refleje tanto el efecto del tratamiento al que pertenece como el del bloque en que se encuentra.

El modelo estadístico [8] está asociado a este diseño se expresa como:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad [8]$$

Donde:

Y_{ij} = medición que corresponde al tratamiento i y al bloque j ;

μ = media global poblacional;

τ_i = efecto debido al tratamiento i ;

γ_j = efecto debido al bloque j ;

ε_{ij} = es el error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij} .

Para el análisis estadístico de las variables IPA en diámetro (cm), área basal (m^2/ha) y volumen (m^3/ha), se calculó el promedio y la desviación estándar considerando el total de individuos, así como aquellas especies con un valor de importancia mayor al 5% en cada tratamiento. Estos cálculos se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Adicionalmente, se evaluaron las variables de densidad, mortalidad y reclutamiento por tratamiento.

Con los datos, se realizaron pruebas de supuestos de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilks (Shapiro y Wilk 1965) considerando un $p \geq 0,05$ y homocedasticidad (igualdad de varianzas) mediante el test de Bartlett, considerando que los bloques y subparcelas tienen tamaños similares (Gutiérrez y De La Vara R 2008).

En el caso de cumplirse la condición de normalidad y homocedasticidad de las varianzas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). En el caso de obtener diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software Rstudio versión 4.4.2.

3 RESULTADOS

3.1 Distribución diamétrica

Al comparar la distribución diamétrica del rodal posterior a aplicados los tratamientos (año 2015) con la del año 2021, se observó que se mantuvo la J invertida y que hubo una leve disminución de en la clase diamétrica 5 (cm) en comparación a las siguientes clases, que presentaron un aumento en la densidad en el año 2021 respecto al año 2015. Las mayores clases diamétricas (115 a 260 cm) se mantuvieron, con el objetivo de conservar las características de bosque adulto (figura 3).

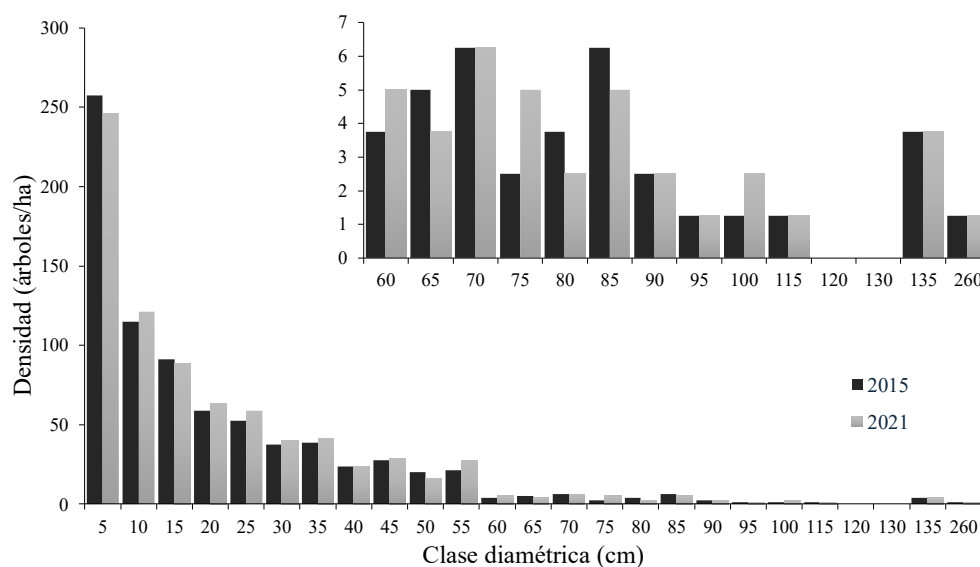


Figura 3. Distribución diamétrica del rodal luego de aplicados los tratamientos de rehabilitación.

3.2 Crecimiento a nivel de rodal para el período 2015-2021

La densidad y el área basal fueron similares entre los años 2015 y 2021 (Cuadro 7). En las clases diamétricas 10-20 cm y 40-70 cm se registró un aumento en la densidad y una disminución en la clase diamétrica 5-10 cm.

Cuadro 7. Variables dasométricas promedio del rodal post tratamientos silviculturales y después de 6 años

Clases diamétricas	Densidad (árboles/ha)		DAP (cm)		Altura promedio (m)		Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)	
	2015	2021	2015	2021	2015	2021	2015	2021	2015	2021
5-10	258	246	8,8	7,3	10,6	10,6	1,1	1,1	5,0	5,2
10-20	188	209	17,4	14,4	16,3	16,6	3,0	3,5	19,1	24,8
20-40	206	205	34,7	28,6	24,3	24,6	13,1	13,8	113,2	118,8
40-70	101	116	63,5	53,5	30,1	30,8	20,9	26,9	189,2	251,2
>70	30	20	123,2	111,8	35,4	36,4	26,5	22,5	275,6	234,4
Total	783	796	49,5	43,1	19,0	19,4	64,6	67,9	602,1	634,3

3.3 Crecimiento para el periodo 2015 y 2021

Al comparar los crecimientos entre tratamientos en el período 2015-2021 (Anexo 2), se observa que el único tratamiento que presentó una disminución en densidad fue el Tratamiento 1 (control). En contraste, los demás tratamientos aumentaron el número de individuos. El Tratamiento 2, donde se aplicó únicamente corta de mejoramiento, fue el que registró el mayor incremento en densidad, principalmente por el reclutamiento de *L. philippiana*, *P. saligna* y *G. avellana*, en clases diamétricas bajas (10-20 cm y 20-40 cm). Por su parte, el Tratamiento 4, que combinó corta de mejoramiento, control de sotobosque y escarificación del suelo, presentó el aumento más reducido en densidad.

En el caso del Tratamiento 1 (control), a pesar de la disminución en el número de árboles, el área basal y el volumen se mantuvieron estables, aunque con incrementos mínimos respecto a los demás tratamientos. El DMC mostró un aumento marginal de 0,5 cm, mientras que los valores de importancia permanecieron casi sin variaciones. Destaca la desaparición de *A. chilensis* en 2021, atribuible probablemente a la competencia por luz en ausencia de intervenciones.

El Tratamiento 2 mostró el mayor dinamismo, la densidad aumentó principalmente por el reclutamiento de especies tolerantes y semitolerantes a la sombra (*A. punctatum* y *L. philippiana*), aunque el DMC se redujo levemente en 1 cm debido al ingreso de individuos de menor diámetro. No obstante, este tratamiento fue el que obtuvo el mayor incremento proporcional en área basal (7%) y volumen (8%) en comparación con los demás.

Los Tratamientos 3 y 4 también mostraron incrementos en densidad y ligeros cambios en DMC. Entre ambos, el Tratamiento 3 destacó por presentar mayores aumentos en área basal y volumen, en contraste con el Tratamiento 4, donde dichos incrementos fueron más limitados.

En cuanto a la composición, todos los tratamientos se encuentran dominados por especies tolerantes y semitolerantes a la sombra. El Tratamiento 1 (control) mantiene el mayor número de especies, seguido del Tratamiento 3 (10 especies), mientras que los Tratamientos 2 y 4 cuentan con 9 especies cada uno.

3.4 Incremento periódico anual en diámetro, área basal y volumen por tratamientos.

Con respecto a el incremento periódico anual (IPA) en diámetro por clase diamétrica y tratamiento para el periodo 2015-2021 (figura 4), se obtuvo que no hay diferencias significativas (p valor $> 0,05$). Sin embargo, se observa que los valores promedio del IPA van aumentando hasta el rango diamétrico 20-40 cm y posteriormente va disminuyendo a medida que los individuos tienen fustes con DAP intermedios y superiores.

En los dos primeros rangos diamétricos, 5-10 y 10-20 cm, se observan valores de IPA que fluctúan entre 0,0 y 0,3 cm/año, con una baja dispersión. En la clase 20-40 cm, se observó un mayor promedio y mayor variación en el tratamiento más intensivo (T4).

En los últimos dos rangos diamétricos, 40-70 y >70 cm el IPA tiende a disminuir y presenta una mayor variabilidad en el T4.

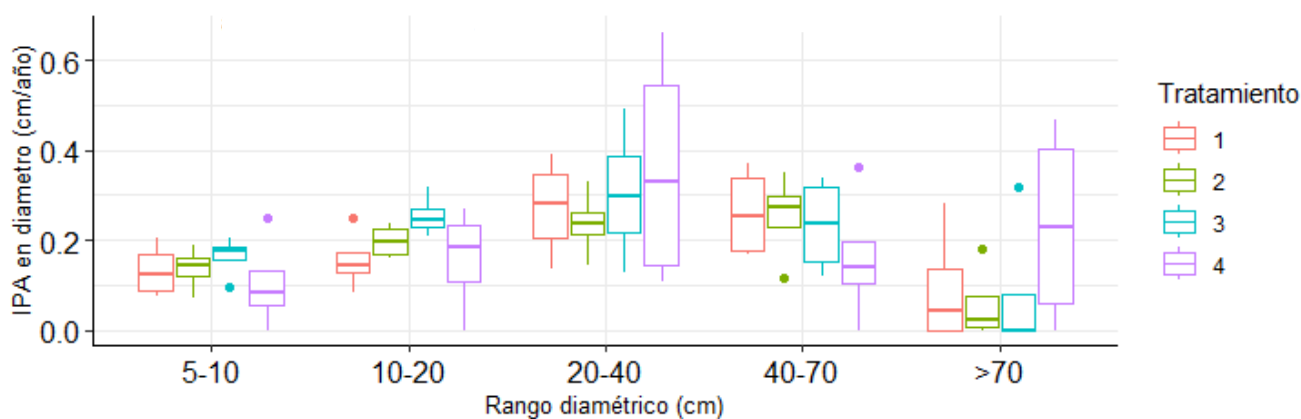


Figura 4. Boxplots de incremento periódico anual en diámetro por rango diamétrico (cm) y tratamientos, al 95% de confianza. En este análisis no hay diferencias estadísticas significativas entre tratameintos ($p > 0,05$).

El IPA respecto al área basal (figura 5), no presentó diferencias significativas (p valor $> 0,05$) a excepción del rango diamétrico 40-70 cm (p valor = 0,01). El tratamiento más intensivo (T4), presentó un menor IPA, respecto a los demás tratamientos.

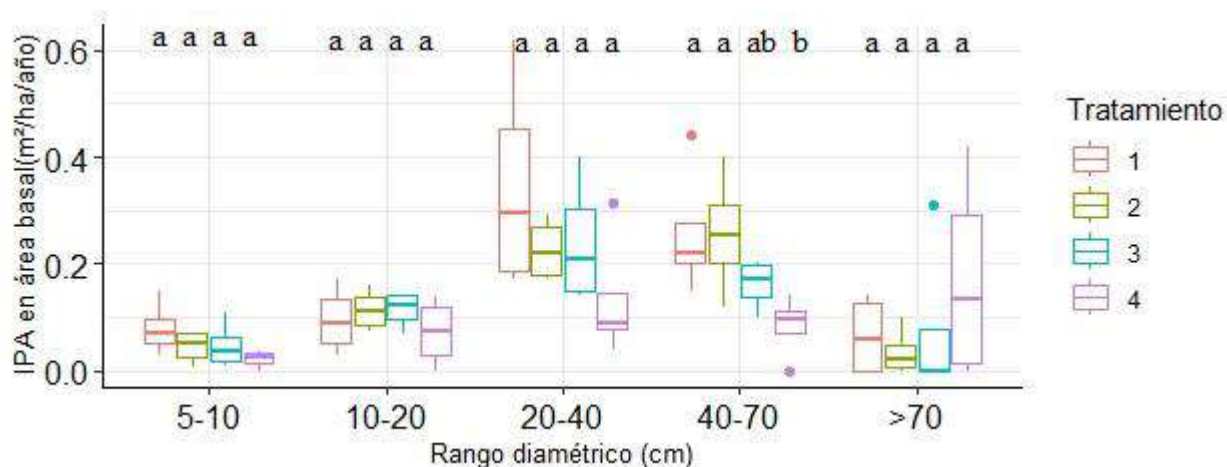


Figura 5. Boxplots de diferencias estadísticas en incremento periódico anual en área basal por rango diamétrico (cm) y tratamientos, al 95 % de confianza. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$).

En el caso del IPA en volumen (figura 6), se pudo observar una tendencia similar en el IPA de área basal, solo en el rango diamétrico 40-70 cm (p valor = 0,01) se obtuvo diferencias significativas, específicamente, en donde el tratamiento más intensivo (T4), presentó un menor incremento en volumen cada año, y en el tratamiento con solo corta de mejoramiento (T2), un mayor incremento en volumen.

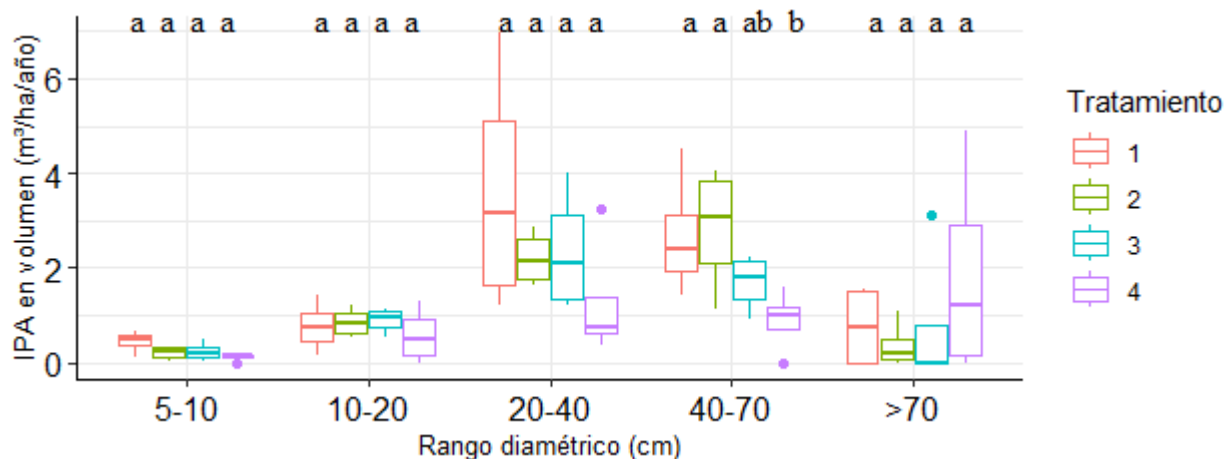


Figura 6. Boxplots de diferencias estadísticas en incremento periódico anual en volumen por rango diamétrico (cm) y tratamientos, al 95% de confianza. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$).

3.5 Incremento periódico anual en diámetro, área basal y volumen, por especie y tratamiento.

Las especies que presentaron un valor de importancia mayor al 5% fueron *A. punctatum* (41%), *E. cordifolia* (17%), *L. philippiana* (15%) y *L. sempervirens* (7%).

En cuanto al incremento periódico anual en diámetro (figura 7), se observaron diferentes respuestas en los tratamientos para cada especie. Sin embargo, de las cuatro especies analizadas solo *L. sempervirens*, fue la única especie que mostró diferencias significativas (p valor = 0,03), ya que el tratamiento con mayor intensidad (T4), presentó diferencias respecto a los demás tratamientos, debido a un mayor incremento en diámetro.

Se pudo interpretar que no hubo diferencias significativas entre tratamientos para las especies *A. punctatum*, *E. cordifolia*, y *L. philippiana*. *A. punctatum* mostró una respuesta homogénea general en el incremento entre los diferentes tratamientos, sin embargo, el tratamiento 3, con cortas de mejoramiento y control de sotobosque y el tratamiento 4, con mayor intensidad, ya que se le agregó escarificación de suelo, presentaron mayor variabilidad para la especie. *E. cordifolia* y *L. philippiana* mostraron un aumento en su incremento en el tratamiento 3.

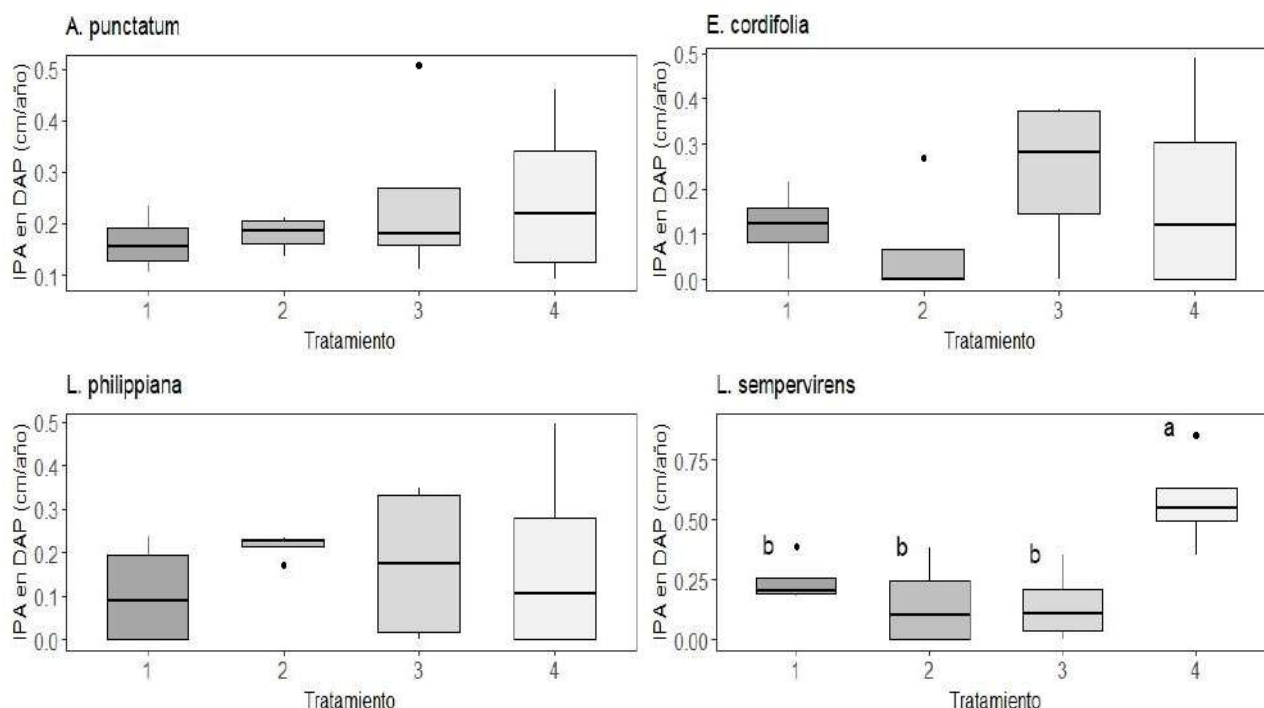


Figura 7. Boxplots de incremento periódico anual en diámetro de especies con mayor valor de importancia en rodal (>5%) por tratamiento, al 95 % de confianza. Letras diferentes indican que hay diferencias significativas ($p < 0,05$).

Se observó el IPA en área basal (figura 8), donde las especies, *E. cordifolia*, *L. philippiana* y *L. sempervirens* no presentaron diferencias significativas (p valor $> 0,05$).

A. punctatum presentó diferencias significativas (p valor = 0,07, con 95% de confianza), debido a que el incremento periódico anual en área basal fue menor en el tratamiento más intensivo (T4) en comparación a los otros tratamientos, además se pudo observar que en el tratamiento dos, solo con corta de mejoramiento, obtuvo mayores incrementos.

E. cordifolia presentó una alta variabilidad en el tratamiento 4. *L. philippiana* presentó IPA similares entre los tratamientos, salvo el tratamiento 3, donde también tuvo mayor variabilidad. *L. sempervirens*, tuvo un mayor incremento, en el tratamiento 4, sin embargo, no presentó diferencias significativas estadísticamente.

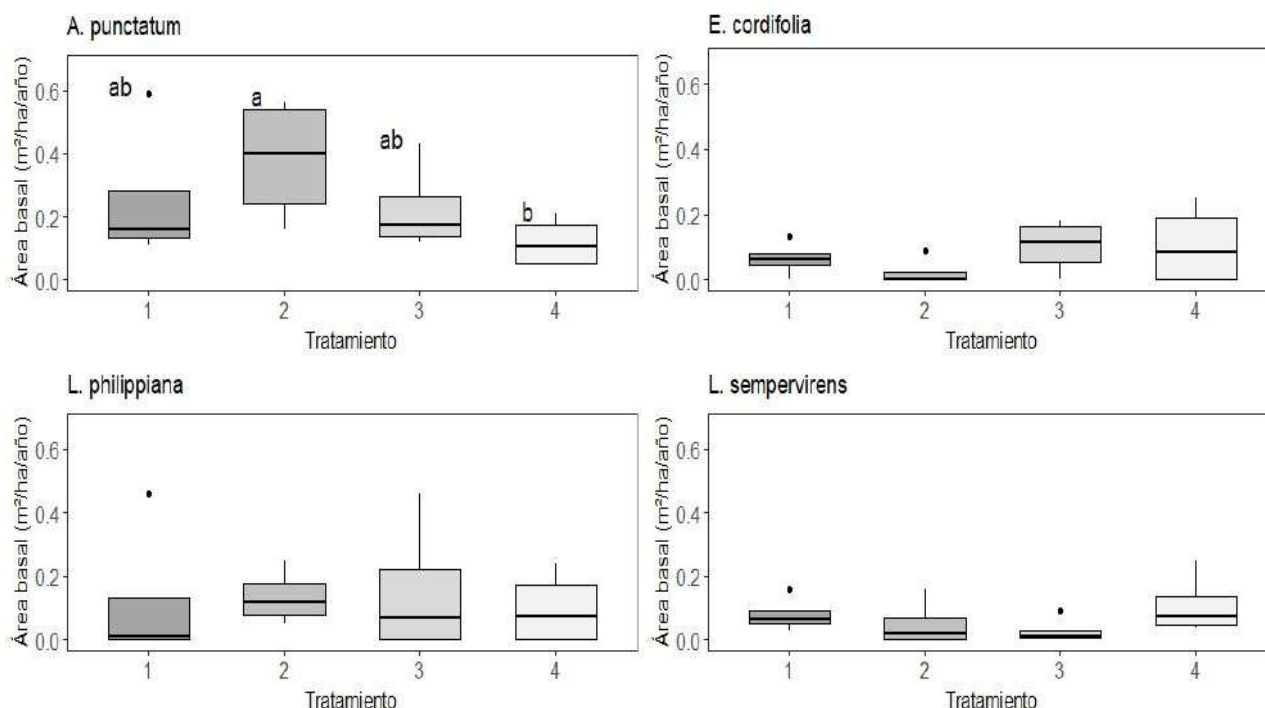


Figura 8. Boxplots de incremento periódico anual en área basal de especies con mayor valor de importancia en rodal (> 5%) por tratamiento, al 95% de confianza. Letras diferentes indican que hay diferencias significativas ($p < 0,1$).

En el incremento periódico anual en volumen (figura 9) se obtuvo la misma tendencia que en el IPA de área basal, donde las especies, *E. cordifolia* y *L. philippiana* y *L. sempervirens* no presentaron diferencias significativas (p valor > 0,05).

A. punctatum presentó diferencias significativas (p valor = 0,07, con 95% de confianza), debido nuevamente al bajo incremento periódico anual en volumen el tratamiento más intensivo (T4), también el tratamiento solo de cortas de mejoramiento (T2), presentó el mayor incremento entre los demás.

E. cordifolia a pesar de no presentar diferencias estadísticas significativas, mostró un incremento en volumen mayor en los tratamiento más intensivos, T3 y T4. *L. philippiana* mostró un incremento homogéneo entre los tratamientos y *L. sempervirens* a pesar no presentar diferencias significativas, tuvo un mayor incremento en volumen en el tratamiento 4, donde se aplicaron con mayor intensidad los tratamientos silviculturales.

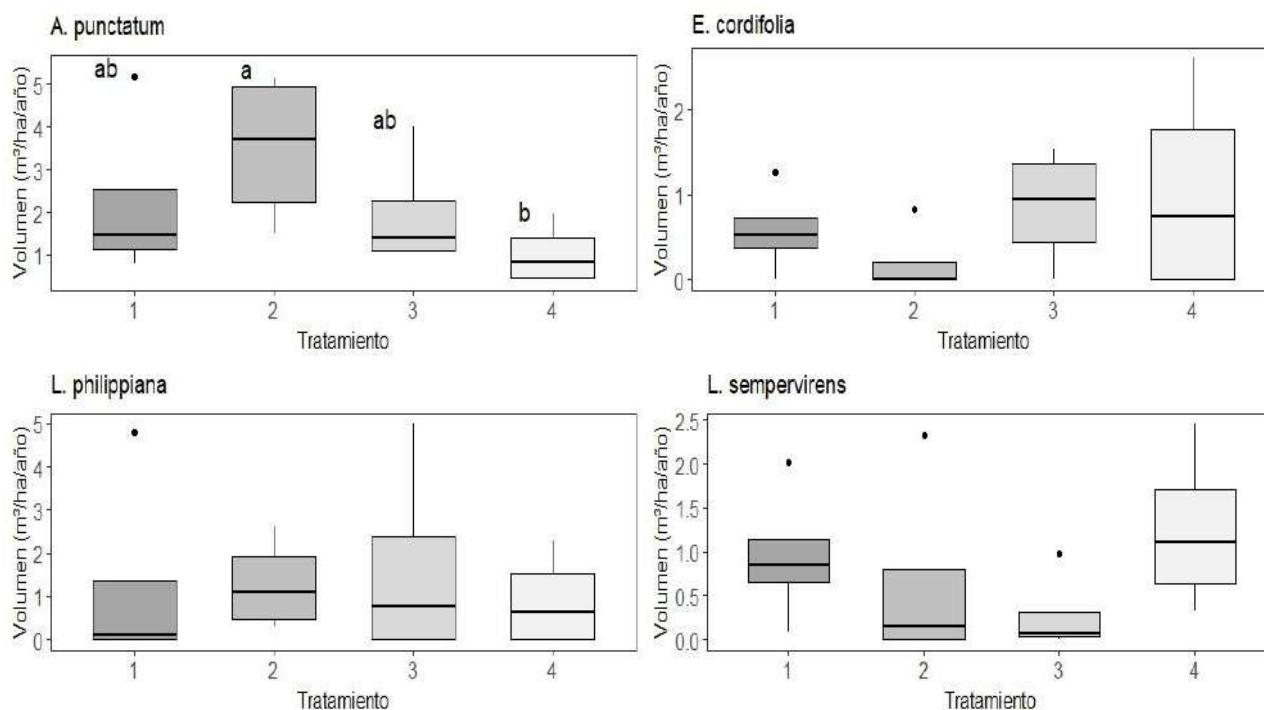


Figura 9. Boxplots de incremento periódico anual en volumen de especies con mayor valor de importancia en rodal (> 5%) por tratamiento, al 95 % de confianza. Letras diferentes indican que hay diferencias significativas ($p < 0,1$).

3.6 Mortalidad

La mayor mortalidad total en densidad (95- 105 árboles/ha) en el periodo analizado se registró en el tratamiento sin intervenciones (T1) y la menor mortalidad (5-10 árboles/ha) se registró en el tratamiento más intensivo (T4), es decir, la mortalidad fue menor en los tratamientos con menor área basal y volumen residual (figura 10).

Al comparar la mortalidad total promedio de los individuos por tratamiento, se obtuvo que la mayor mortalidad fue en los cuadrantes sin intervención (T1). Por el contrario, en el resto de los tratamientos, la mortalidad se redujo.

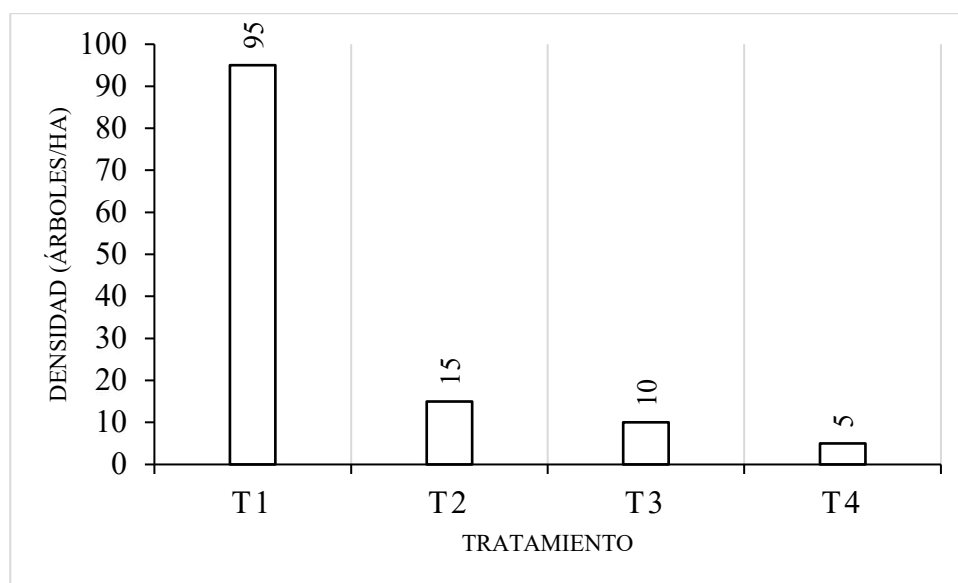


Figura 10. Mortalidad total promedio por tratamiento para el periodo 2015-2021.

En el tratamiento control (T1), presentó mortalidad en 8 especies (Cuadro 8), con mayor mortalidad en *R. spinosus*, *G. avellana*, *A. punctatum* y *A. chilensis*, cabe destacar que los diámetros promedio del DAP de estas especies son entre 5,4 y 14,2 cm. Por el contrario, en el resto de los tratamientos se presentó mortalidad entre 1 y 2 especies, de individuos de DAP menores a 6,6 cm.

Además, se registró la mortalidad de un individuo de DAP 80,5 cm de la especie *E. cordifolia* en contraste a los diámetros menores, producto de su caída.

Cuadro 8. Variables dasométricas promedio y su desviación estándar de los individuos muertos por especie y tratamiento.

Tratamiento 1						
Especie	Densidad (árboles/ha)		DAP (cm)	Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)
<i>A. chilensis</i>	10 ±	20	8	0,1 ±	0,1	0,3 ± 0,6
<i>A. punctatum</i>	15 ±	19	8,8	0,1 ±	0,1	0,5 ± 0,5
<i>E. cordifolia</i>	5 ±	5	80,5	2,5 ±	5,1	24,3 ± 48,6
<i>G. avellana</i>	20 ±	40	14,2	0,4 ±	0,8	3,9 ± 7,8
<i>L. dentata</i>	10 ±	12	6,3	0 ±	0	0,1 ± 0,1
<i>L. philippiana</i>	5 ±	10	7,4	0 ±	0	0,1 ± 0,2
<i>L. sempervirens</i>	5 ±	10	7,1	0 ±	0	0,1 ± 0,2
<i>R. spinosus</i>	25 ±	38	5,4	0,1 ±	0,1	0,3 ± 0,3
Total	95 ±	105	17,2	3,3 ±	6,2	29,5 ± 57,7
Tratamiento 2						
Especie	Densidad (árboles/ha)		DAP (cm)	Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)
<i>E. cordifolia</i> *	5 ±	10	93,0	3,4 ±	6,8	27,8 ± 55,6
<i>R. spinosus</i>	10 ±	12	5,5	0 ±	0	0 ± 0
Total	15 ±	19	49,3	3,4 ±	6,8	27,8 ± 55,6
Tratamiento 3						
Especie	Densidad (árboles/ha)		DAP (cm)	Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)
<i>E. cordifolia</i>	5 ±	10	6	0 ±	0	1,1 ± 2,2
<i>L. philippiana</i>	5 ±	10	6,4	0 ±	0	0,1 ± 0,2
Total	10 ±	12	6,2	0 ±	0	1,17 ± 2,1
Tratamiento 4						
Especie	Densidad (árboles/ha)		DAP (cm)	Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)
<i>E. cordifolia</i>	5 ±	10	6,6	0 ±	0	0,1 ± 0,2
Total	5 ±	10	6,6	0 ±	0	0,1 ± 0,2

*: árbol caído.

A pesar de que el tratamiento sin intervenciones presentó una mayor mortalidad y el tratamiento más intensivo una considerable mortalidad menor, no se encontraron diferencias significativas estadísticamente (figura 11).

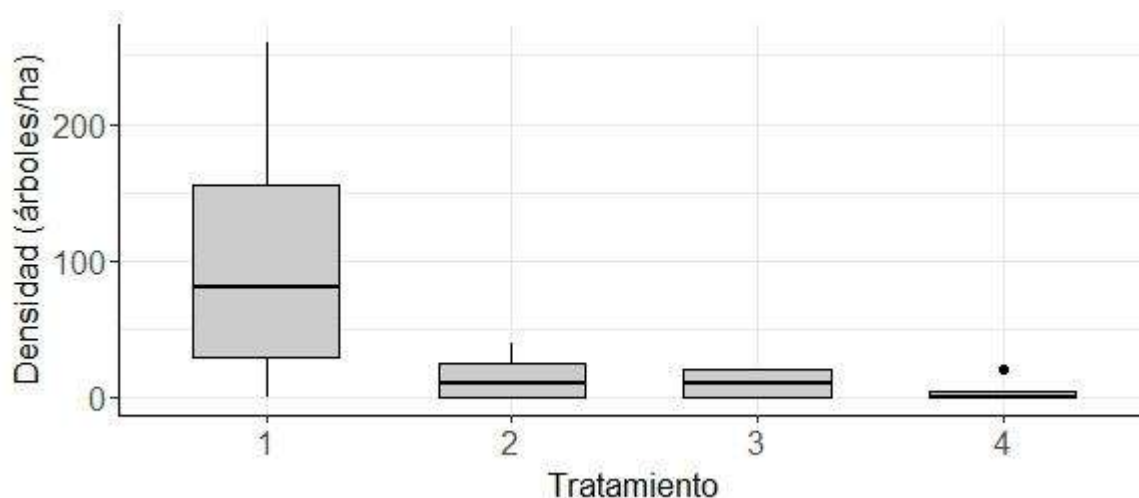


Figura 11. Boxplots de diferencias estadísticas en la mortalidad total por tratamiento, al 95 % de confianza. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$).

3.7 Reclutamiento

En el periodo analizado, el reclutamiento total fue de 175 árboles/ha con una tasa de reclutamiento promedio de 29 árboles/ha/año. Como se observa en la figura 12, se registraron nuevos individuos entre 5 a 13 cm de DAP, concentrándose principalmente en individuos de DAP < 7 cm.

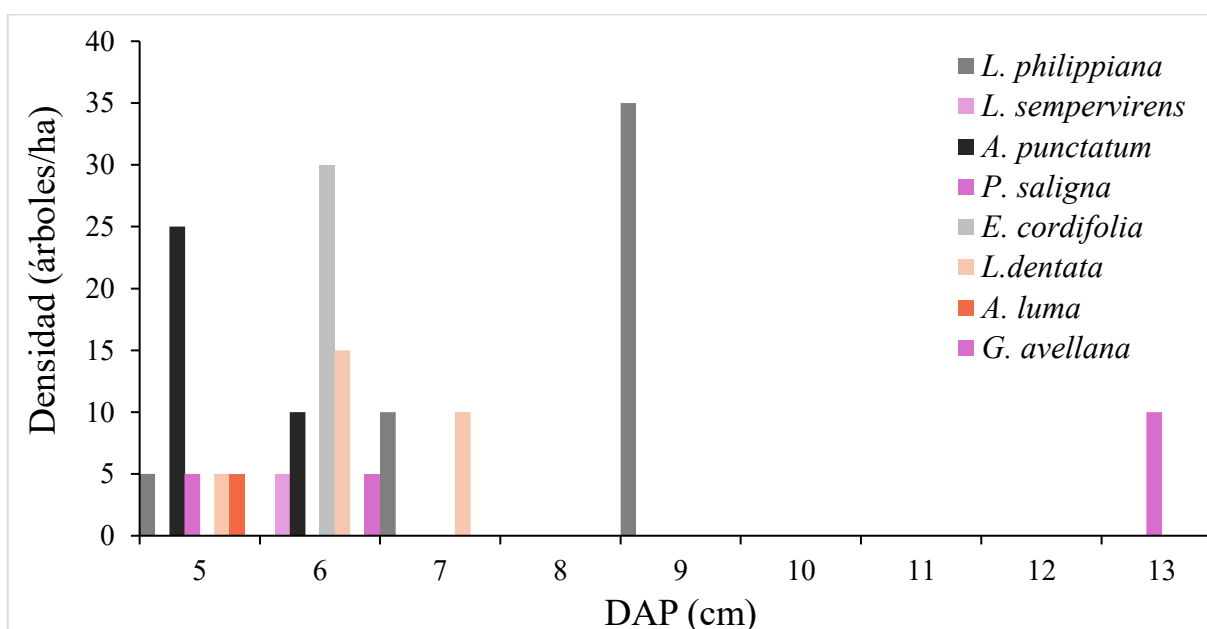


Figura 12. Distribución diamétrica de los individuos reclutados por especie en el periodo 2015-2021.

Al comparar el reclutamiento por tratamiento, se obtuvo que en todos los tratamientos se registró reclutamiento, fueron en su totalidad especies semitolerantes (55 árboles/ha) y tolerantes (120 árboles/ha) a la sombra.

Cuadro 9. Variables dasométricas promedio y su desviación estándar (Ds) de los individuos reclutados por especie y tratamiento en el periodo 2015-2021.

Especie	Tolerancia	T1						T2					
		Densidad (árboles/ha)		Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)		Densidad (árboles/ha)		Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)	
<i>A. punctatum</i>	Tolerante	10 ± 20	0,03 ± 0,06	0,13 ± 0,13	10 ± 10	0,02 ± 0,03	0,10 ± 0,12						
<i>A. luma</i>	Tolerante	5 ± 10	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,02	- - -	- - -	- - -						
<i>E. cordifolia</i>	Semi	- - 10	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -						
<i>G. avellana</i>	Semi	- - 10	- - -	- - -	5 ± 5	0,01 ± 0,03	0,03 ± 0,05						
<i>L. sempervirens</i>	Semi	5 ± 10	0,01 ± 0,02	0,03 ± 0,03	- - -	- - -	- - -						
<i>L. philippiana</i>	Tolerante	5 ± 10	0,02 ± 0,04	0,08 ± 0,08	35 ± 35	0,11 ± 0,12	0,50 ± 0,58						
<i>L. dentata</i>	Tolerante	10 ± 10	0,02 ± 0,05	0,05 ± 0,05	10 ± 10	0,03 ± 0,04	0,08 ± 0,11						
<i>P. saligna</i>	Semi	5 ± 10	0,01 ± 0,02	0,05 ± 0,05	10 ± 10	0,13 ± 0,26	1,06 ± 2,12						
Total ± Ds		40 ± 54	0,10 ± 0,13	0,36 ± 0,36	70 ± 53	0,31 ± 0,36	1,77 ± 2,44						
Especie	Tolerancia	T3						T4					
		Densidad (árboles/ha)		Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)		Densidad (árboles/ha)		Área basal (m ² /ha)		Volumen (m ³ /ha)	
<i>A. punctatum</i>	Tolerante	10 ± 12	0,02 ± 0,02	0,09 ± 0,11	5 ± 5	0,01 ± 0,02	0,05 ± 0,09						
<i>A. luma</i>	Tolerante	- ± 0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	- - -	- - -	- - -						
<i>E. cordifolia</i>	Semi	30 ± 60	0,06 ± 0,13	0,29 ± 0,58	- - -	- - -	- - -						
<i>G. avellana</i>	Semi	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -						
<i>L. sempervirens</i>	Semi	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -						
<i>L. philippiana</i>	Tolerante	5 ± 10	0,01 ± 0,02	0,04 ± 0,07	5 ± 5	0,02 ± 0,04	0,08 ± 0,16						
<i>L. dentata</i>	Tolerante	5 ± 10	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,04	5 ± 5	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,05						
<i>P. saligna</i>	Semi	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -						
Total ± Ds		50 ± 87	0,10 ± 0,18	0,44 ± 0,76	15 ± 15	0,04 ± 0,06	0,15 ± 0,19						

A pesar de que se obtuvo un mayor reclutamiento en los cuadrantes de cortas de mejoramiento (T2), no se encontraron diferencias significativas (p valor = 0,6) entre tratamientos (figura 13).

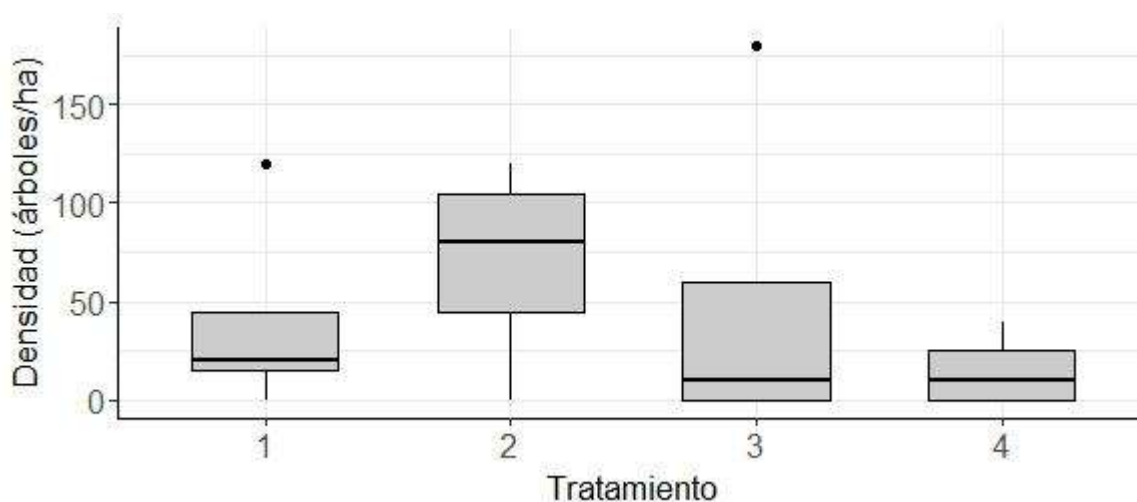


Figura 13. Boxplots de diferencias estadísticas en el reclutamiento total por tratamiento al 95 % de confianza. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$).

3.8 Incrementos anuales netos y brutos en área basal y volumen por tratamiento

Para comparar de manera más sintética el efecto de los tratamientos, se calculó el incremento neto y bruto en área basal y volumen por tratamiento (Cuadro 10). En cuanto al incremento neto anual, tanto en área basal como en volumen, el tratamiento más intensivo (T4), presentó los valores más bajos, mientras que el tratamiento de cortas de mejoramiento (T2), mostró el mayor incremento neto y bruto anual.

El reclutamiento fue más alto en el tratamiento de cortas de mejoramiento (T2), seguido por el tratamiento control seguido por el tratamiento donde se aplicó corta de mejoramiento más control de sotobosque (T3), en contraste con el tratamiento más intensivo (T4) con menores valores. Respecto a la mortalidad, se registraron los valores más altos en los tratamientos T1 y T2, el más bajo en el tratamiento T4, cabe destacar que la mortalidad fue mayor en aquellos cuadrantes, debido a que en cada tratamiento se registraron individuos muertos de DAP >80 cm, sin embargo, la densidad en el T2 fue menor al tratamiento T1.

Por lo tanto, el resultado en el incremento bruto fue mayor en el tratamiento T2 y menor en el tratamiento T4.

Cuadro 10. Incremento anual neto y bruto en área basal y volumen según tratamiento

Tratamiento	Incremento neto	Reclutamiento	Mortalidad	Total (I. bruto)
ÁREA BASAL (m ² /ha)				
T1	0,16	0,105	0,55	0,81
T2	0,12	0,308	0,57	1,00
T3	0,12	0,105	0,01	0,23
T4	0,09	0,04	0,00	0,13
VOLUMEN (m ³ /ha)				
T1	1,64	0,36	4,92	6,92
T2	1,24	1,77	4,64	7,65
T3	1,18	0,43	0,20	1,81
T4	0,94	0,14	0,02	1,10

4 DISCUSIÓN

4.1 Efecto de los tratamientos en el crecimiento, área basal y volumen

4.1.1 Análisis a nivel de rodal y tratamiento

La estructura diamétrica a nivel de rodal, considerando todas las variables en conjunto de todas las parcelas, después de 6 años de la aplicación de los tratamientos, presenta una distribución del tipo J inversa, donde las clases diamétricas menores presentan mayor densidad y disminuye a medida que aumenta el diámetro, característico de bosques multietáneos (Nyland 2016). Según lo descrito por Ponce et al. (2017), esta condición indicaría que el rodal estudiado se encuentra en la etapa de bosque adulto, ya que presenta una densidad menor a >1500 árboles por hectárea. Además, se identificaron árboles superiores a 70 cm de diámetro, los cuales representan el 41% del área basal del rodal (30,3 m²/ha) destacando el mayor diámetro de 260 cm. Además, en el proyecto desarrollado por Donoso et al. (2018a), el manejo silvicultural estuvo orientado a conservar las características de bosque adulto.

En el período 2015-2021, el rodal en Pumillahue registró un incremento neto de 0,55 m²/ha/año en área basal y 6,8 m³/ha/año en volumen. Estos valores presentan el crecimiento acumulado del rodal en respuesta a los distintos tratamientos silviculturales de rehabilitación, sin categorizar por tratamiento. Si bien no existen estudios previos del incremento en área basal en bosques adultos degradados del tipo forestal siempreverde, Salas et al. (2018) reportaron en un bosque adulto sin intervenciones del tipo

forestal RORACO, incrementos en rodales de roble-olivillo-ulmo cercanos a $-0,28 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y $-3,9 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en volumen, valores inferiores a los registrados en el rodal de Pumillahue. Por su parte, Donoso y Riquelme (2025) informaron en bosques adultos siempreverdes manejados, incrementos periódicos anuales de $0,57$ a $0,68 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y de $3,9$ a $5,9 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en volumen, resultados que se sitúan ligeramente por encima de los valores de área basal obtenidos en el presente estudio, pero inferiores en volumen respecto al promedio alcanzado en Pumillahue.

Al observar los resultados por tratamiento, se evidencia que el tratamiento de corta de mejoramiento (T2) registró el mayor incremento bruto en área basal y volumen en comparación a los demás tratamientos, $0,83 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y en volumen $7,9 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, respectivamente, valores superiores a los registrados por Donoso y Riquelme (2025) en un bosque adulto siempreverde manejado. En contraste al tratamiento sin intervenciones (T1), mostró el menor incremento, $0,35 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y $3,75 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en volumen, valores que se acercan medianamente a los reportados por Donoso y Riquelme (2025).

En base a los resultados, se evidencia que un rodal de bosque adulto degradado del tipo forestal RORACO en transición a siempreverde como el analizado en este estudio, solo realizando cortas de mejoramiento, pueden estimular un incremento superior a rodales sin manejo e incluso a rodales sometidos a tratamientos más intensivos. Sin embargo, es necesario dar un seguimiento a largo plazo para confirmar la tendencia y evaluar su impacto sobre el incremento periódico anual en área basal y volumen.

4.1.2 Análisis por rangos de clases diamétricas

A pesar de no encontrar diferencias estadísticamente significativas en el incremento periódico anual en diámetro entre tratamientos (figura 4) se observó una clara tendencia, los mayores valores se concentraron en las clases diamétricas intermedias, particularmente entre $20\text{-}40 \text{ cm}$ y $40\text{-}70 \text{ cm}$, alcanzando valores a $0,6 \text{ cm}/\text{año}$. En las clases mayores ($>70 \text{ cm}$) y en las clases menores ($5\text{-}10 \text{ cm}$), el crecimiento en diámetro fue considerablemente más bajo. Esta tendencia coincide con lo reportado por Donoso y Pilquinao (2013), quienes obtuvieron en bosques siempreverdes compuestos principalmente por especies semitolerantes y tolerantes a la sombra, mayores incrementos en las clases diamétricas intermedias ($20\text{-}50 \text{ cm}$). Asimismo, Vásquez (2025) describió un comportamiento similar en un bosque adulto siempreverde sin intervenciones, destacando los mayores incrementos en diámetro en las clases de $15\text{-}30$ y $45\text{-}60 \text{ cm}$.

En cuanto al incremento periódico anual en área basal y volumen, los resultados fueron similares a las observadas en incremento en diámetro (figura 5 y 6). Se registraron los mayores incrementos en las clases intermedias (20-40 cm y 40-70 cm), a diferencia en incremento en diámetro en área basal y volumen se detectaron diferencias estadísticamente significativas en el rango diamétrico 40-70 cm, donde el tratamiento de solo cortas de mejoramiento (T2), presentó valores significativamente superiores al tratamiento más intensivo (T4). En las clases >70 cm, el crecimiento fue bajo en la mayoría de los tratamientos, aunque con una mayor dispersión de valores, especialmente en el tratamiento más intensivo (T4), que mostró algunos datos elevados.

No existen estudios específicos que documenten el incremento periódico anual por clases diamétricas en bosques adultos degradados del tipo forestal siempreverde en Chile. No obstante, Salas et al. (2018) reportaron incrementos en bosques adultos de roble-olivillo-ulmo en Rucamanque, donde se observaron incrementos en área basal y volumen entre 0,02 m²/ha/año y 0,20 m³/ha/año para rodales dominados por *Nothofagus*, mientras que, en otras especies del mismo bosque se registraron valores incluso negativos (hasta -0,28 m²/ha año en área basal y -3,9 m³/ha/año en volumen). Estos valores son notablemente inferiores a los obtenidos en este estudio, donde el IPA fluctúa entre 0,0 y 0,6 m²/ha/año en área basal, y entre 0,0 y 6 m³/ha/año en volumen.

Finalmente, aunque se observó variabilidad en el comportamiento de los tratamientos, no se identificó un tratamiento que de manera constante presentara los mayores valores de crecimiento en todos los rangos diamétricos. Esto indica que las respuestas al manejo silvicultural en este tipo de bosque degradado son heterogéneas y dependientes del rango diamétrico.

4.1.3 Análisis por especies con mayor valor de importancia

A.punctatum mostró una variada respuesta en incremento en diámetro área basal y volumen entre los tratamientos.

El incremento promedio en diámetro varió entre los tratamientos de 0,16 a 0,25 cm/año, incrementos superiores a los obtenidos por Vásquez (2025), quien reportó incrementos diferenciados por clases diamétricas en el rango entre 0,13 y 0,15 cm/año, y destacó una estabilidad en las tasas de crecimiento diamétrico intermedio, de aquellos individuos con un DAP de 10 a 60 cm. En el caso del incremento de área basal, Donoso (2002) señala que *A. punctatum* presentó diferencias en sus tasas de crecimiento según el área basal del rodal, obteniendo que en rodales con un el área basal menor a 75 m²/ha el diámetro incrementa en 0,3 cm/año y en rodales con mayor área basal, el incremento es menor

(0,16 cm/año), esto también se observó entre los distintos tratamientos analizados en este estudio, ya que en aquellos cuadrantes con el tratamiento testigo (T1), eran los cuadrantes con mayor área basal y donde el incremento en diámetro promedio fue el menor, de 0,16 cm/año. El incremento medio aumentó a 0,24 cm/año en tratamientos con menor área basal en comparación al tratamiento testigo, sin embargo, en el rodal estudiado en Pumillahue el incremento en área basal y volumen fue mayor en el tratamiento 2 y menor en el tratamiento 4.

E. cordifolia en el tratamiento 3, que contempló cortas de mejoramiento y control de sotobosque, presentó los mejores resultados en términos de incremento en diámetro, área basal y volumen, destacando especialmente en el incremento periódico anual en diámetro, mientras que en los aumentos en área basal y volumen fueron más sutiles. De manera similar, el tratamiento 4, que incluyó corta de mejoramiento, control de sotobosque y escarificación del suelo, evidenció también incrementos superiores a los demás tratamientos (T1 y T2). Estos resultados sugieren que los tratamientos más intensivos, asociados a una reducción de la competencia, favorecen el crecimiento de esta especie.

En este sentido, Uteau et al. (2003) evaluaron el incremento medio anual de *E. cordifolia* en una plantación mixta, observando que esta especie, al quedar suprimida por otras especies de la plantación (*Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua*), disminuye su tasa de crecimiento. Por ello, recomiendan la implementación de raleos para reducir la competencia y mantener el potencial de crecimiento de la especie.

En *L. philippiana*, no se observaron diferencias en los incrementos entre tratamientos; no obstante, se aprecia una ligera tendencia a mayores valores promedio de incremento en diámetro, área basal y volumen en el tratamiento 2, que contempló solo cortas de mejoramiento. Esta respuesta podría explicarse por el comportamiento de la especie en bosques adultos, ya que Donoso (2013) señala que la especie presenta un menor crecimiento en rodales con estructuras multietáneas, de tipo J inversa. Asimismo, el periodo de seis años de evaluación podría ser insuficiente para evidenciar diferencias marcadas en las tasas de crecimiento de la especie, dada a su dinámica de crecimiento lento en bosques adultos siempreverdes. Además, en Donoso y Navarro (2022) señalan que *L. philippiana* el crecimiento en diámetro por año varía entre 0,2 a 0,5 cm/año en un rodal del tipo forestal Siempreverde sin manejo, valores que se encuentran en el rango obtenidos en este estudio (0,0 a 0,5 cm/año).

La especie *L. sempervirens* mostró un mayor incremento en el tratamiento más intensivo (T4), en diámetro, área basal y volumen, donde había menos densidad total inicial y una menor competencia, lo que pudo influir en el incremento en el diámetro, esto es consistente con lo señalado por Donoso et al. (2018b), quienes mencionan respecto del crecimiento en diámetro, que esta especie podría verse beneficiada con una apertura de dosel y la disminución de la competencia.

4.2 Efecto de los tratamientos silviculturales en la mortalidad y reclutamiento

4.2.1 Mortalidad

A pesar de la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en el caso de la mortalidad, atribuibles a la alta variabilidad de los datos, se observa una clara tendencia a la disminución de esta, cuando se aplican tratamientos silviculturales para la rehabilitación en bosques adultos degradados como el evaluado en este estudio. En este sentido el tratamiento sin intervenciones (T1) registró la mayor mortalidad entre los tratamientos, con 95 árboles/ha, concentrándose principalmente en individuos del primer rango diamétrico (5–10 cm). Este estudio es consistente con lo señalado por Donoso y Navarro (2022), los bosques adultos con distribución diamétrica de tipo J inversa, la mortalidad se concentra en las clases diamétricas menores y en las clases diamétricas mayores. La elevada mortalidad podría atribuirse a una mayor competencia por recursos, especialmente luz, causado por la elevada densidad del rodal. En este mismo sentido, en ausencia de intervenciones, se registró la muerte de especies intolerantes a la sombra como *A. chilensis* y *R. spinosus*, lo que pudo ser consecuencia de la escasa disponibilidad lumínica por la alta densidad (1.260 árboles/ha) del tratamiento, es un claro ejemplo de lo señalado por Donoso y Navarro (2022), acerca de estas especies, que, al ser pioneras, quedan rezagadas en los doseles inferiores y comienzan a morir.

Vásquez (2025) reportó en un bosque adulto siempreverde sin intervenciones con una densidad inicial de 1.144 árboles/ha, una mortalidad considerablemente menor: 15 árboles/ha en el período 2015–2019, aumentando a 35 árboles/ha en el periodo 2019–2023 con una densidad inicial de 1.127 árboles/ha. Aun con este aumento, las tasas reportadas permanecen por debajo de las observadas en el tratamiento control, y se asemejan a las del tratamiento 2, donde se aplicaron únicamente cortas de mejoramiento.

Los estudios sobre mortalidad en bosques adultos degradados del tipo forestal siempreverde son escasos. Sin embargo, Salas et al. (2018) reportaron una mortalidad de 4 árboles/ha/año en un bosque adulto del tipo roble–olivillo–ulmo en Rucamanque sin intervención aparente con 410 árboles/ha, lo que resulta considerablemente inferior a lo observado en el tratamiento sin intervenciones (T1) del presente estudio. Esta tasa es más cercana a la observada en el tratamiento 2 y mayor a las de los tratamientos 3 y 4, en los que se implementaron prácticas silviculturales más intensivas como corta de mejoramiento, control del sotobosque y escarificación del suelo.

4.2.2 Reclutamiento

A pesar de que el tipo forestal sea RORACO, la densidad de *Nothofagus obliqua* es baja (10-15 árboles/ha) y la composición del rodal es principalmente especies semitolerantes y tolerantes a la sombra, lo que sugiere un estado de sucesión más avanzado y complejo.

El reclutamiento, los nuevos individuos que superaron los 5 cm de DAP, luego de seis años de la aplicación de los tratamientos silviculturales fueron especies semitolerantes y tolerantes a la sombra.

En base a los resultados al aplicar solo cortas de mejoramiento (T2) se obtiene un mayor reclutamiento, 70 árboles/ha, seguido por el tratamiento donde se aplicó corta de mejoramiento y control de sotobosque (T3) con 50 árboles/ha, ambos, superando el tratamiento control (T1) que mostró un reclutamiento de 40 árboles/ha. En contraste, el tratamiento más intensivo, donde se aplicó corta de mejoramiento, control de sotobosque y escarificación de suelo (T4), presentó el menor reclutamiento con 15 árboles/ha, lo cual sugiere que la escarificación de suelo no favorece el reclutamiento en las condiciones de bosque adulto degradado compuesto principalmente por especies semitolerantes y tolerantes a la sombra.

Este resultado es relevante, ya que indica que, en rodales dominados por especies de semitolerantes y tolerantes a la sombra, la escarificación podría obstaculizar que la regeneración se pueda establecer, ya que podría alterar las condiciones necesarias para su establecimiento (humedad, sombra parcial y protección). En cambio, las intervenciones que solo incluyeron la reducción del sotobosque y/o del dosel (T3 y T2), favorecieron un mayor reclutamiento, posiblemente al disminuir la competencia y aumentar la disponibilidad de luz sin alterar las condiciones óptimas para su establecimiento.

Si bien no se encontraron otros estudios previos que reporten el reclutamiento post- intervención de bosques adultos degradados del tipo forestal siempreverde, Vásquez (2025) evaluó el comportamiento del reclutamiento natural en un bosque adulto sin intervenciones del tipo forestal siempreverde, reportó una densidad de reclutamiento de 179 árboles/ha, siendo un valor notablemente mayor del registrado en el tratamiento sin intervenciones (T1, 40 árboles/ha) y en el tratamiento mejor evaluado (T2, 70 árboles/ha).

4.3 Efecto de los tratamientos en el incremento neto y bruto en área basal y volumen

Actualmente no existen estudios con incremento neto y bruto en bosques adulto degradados luego de aplicar tratamientos silviculturales. No obstante, Vásquez (2025) reportó valores de incremento neto

y bruto en dos periodos en un bosque adulto del tipo forestal siempreverde sin intervención y Donoso y Riquelme (2025) en bosques con cortas de selección. En el estudio de Vásquez (2025) para el periodo 2015-2019 el incremento neto fue de $0,08 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y $0,86 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en volumen, mientras que el incremento bruto alcanzó $0,45 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ y $3,59 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ respectivamente, valores similares obtenidos en el área basal del tratamiento más intensivo ($0,09 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ en área basal y $0,94 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en volumen), el cual obtuvo los valores más bajos en comparación a los demás tratamientos. Posteriormente, en el segundo periodo (2019-2023), el incremento neto fue de $0,00 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ y en área basal y $0,18 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, valores inferiores en comparación a todos los tratamientos aplicados en Pumillahue y en volumen con un incremento bruto de $0,61 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ y $4,09 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, valores de volumen cercanos al tratamiento control (T1) e inferiores al tratamiento de corta de mejoramiento (T2). Estos resultados sugieren que el tratamiento con corta de mejoramiento (T2) puede alcanzar incrementos comparables o superior a los de un bosque adulto siempreverde no degradado y sin intervenciones, lo cual indica que este tipo de intervención silvicultural podría contribuir significativamente a la rehabilitación de bosques degradados.

5. CONCLUSIONES

Luego de 6 años de aplicar distintos tratamientos silviculturales para recuperar un bosque adulto degradado en Pumillahue, se obtuvo que en todas las parcelas se mantuvo una estructura diamétrica irregular del tipo J inversa con un $103,9 \text{ m}^2/\text{ha}$ en los cuadrantes sin intervención y $73,2 \text{ m}^2/\text{ha}$ de área basal en parcelas de cortas de mejoramiento, lo que significó en promedio una extracción de $11,9 \text{ m}^2/\text{ha}$ área basal (14,9 %). En aquellos cuadrantes donde solo se aplicó la corta de mejoramiento se registró el mayor aumento anual en densidad (10 árboles/ha/año), área basal ($0,83 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$) y volumen ($7,9 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$). En el caso del reclutamiento, este fue mayor en aquellos cuadrantes donde solo se aplicó corta de mejoramiento, siendo principalmente de especies semitolerantes y tolerantes a la sombra, a diferencia de la mortalidad, que fue mayor en aquellos donde no se realizaron intervenciones, con un promedio total de con 95 árboles/ha, mayoritariamente de individuos de DAP < a 10 cm. En términos de crecimiento en área basal y volumen, los mayores incrementos se presentaron en aquellos individuos de las clases diamétricas intermedias, entre 40 y 70 cm de DAP. A nivel de especies, *Laurelia sempervirens* fue la especie que mostró mayor incremento en diámetro en los cuadrantes con corta de mejoramiento, control de sotobosque y escarificado del suelo, mientras que *Aextoxicon punctatum* tuvo mayores incrementos en área basal y volumen, en los cuadrantes donde se aplicó solo la corta de mejoramiento.

A pesar de que los tratamientos más intensivos no mostraron beneficios adicionales significativos, se concluye que el tratamiento donde solo se aplicó corta de mejoramiento, fue eficaz para estimular el crecimiento, reducir la mortalidad en las clases diamétricas inferiores (5 a 10 cm de DAP) y favorecer el reclutamiento de especies semitolerantes y tolerantes a la sombra, evidenciando su potencial como estrategia eficiente y de menor costo para la rehabilitación de bosques adultos degradados.

6 REFERENCIAS

- Bannister JR, JF Ovalle, R Vargas-Gaete, V Claramunt-Torche. 2024. Restauración de ecosistemas forestales. [VitalSource Bookshelf version]. Consultado nov. 2024. Disponible en <vbk://9789561130869>
- Bannister J, P Donoso, R Mujica. 2016. La silvicultura como herramienta para la restauración de bosques templados. *Bosque (Valdivia)* 37(2):229-235.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2003. Estudio agrológico X Región. Publicación CIREN N° 123. Santiago, Chile. CIREN.
- Donoso C. 1981. Tipo forestal Roble-Raulí-Coihue In Donoso C ed. *Tipos forestales de los bosques nativos de Chile*. Santiago, Chile. p. 43-50.
- Donoso C. 2013. *Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología*. 2ª ed. Valdivia, Chile. M. Cuneo Ediciones. 688 p.
- Donoso H P, B Pilquinao Ñ. 2013. Desarrollo de sistemas sustentables de manejo multietáneo en bosques del tipo forestal siempreverde en el centro-sur de Chile. Informe final Proyecto CONAF 034/2011. Noviembre 2013.
- Donoso PJ. 2002. Structure and growth in coastal evergreen forests as the bases for uneven-aged silviculture in Chile. Tesis Doctorado en Filosofía. Syracuse, New York, USA. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry.
- Donoso PJ, A Vásquez G, D Soto S. 2018a. Desarrollo de estrategias y técnicas para recuperar bosques adultos degradados de los tipos forestales Siempreverde y Coihue-Raulí-Tepa. Informe final Proyecto FIBN 005/2014. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Fondo de Investigación del Bosque Nativo.
- Donoso PJ, DB Ponce, JP Pinto, I Triviño. 2018b. Cambios en cobertura y regeneración arbórea en bosques siempreverdes en diferentes estados sucesionales en el sitio experimental de Llancahue, Cordillera de la Costa de Valdivia, Chile. *Gayana Botánica* 75(2):657-662.

- Donoso PJ, T Riquelme-Buitano. 2025. Results and perspectives of the selection system after a decade of implementation in Valdivian temperate rainforests. *European Journal of Forest Research*. Publicado online. Consultado jul. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01797-y>
- Donoso PJ, C Navarro. 2022. *Silvicultura y manejo de bosques nativos: ecología aplicada para la conservación de ecosistemas forestales*. 1ª ed. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 509 p.
- Drake F, P Emanuelli, E Acuña. 2003. *Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo*. Santiago, Chile. 198 p.
- FAO. 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Términos y definiciones*. Roma, Italy. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Documento de Trabajo 144/S.
- Ghazoul J, Z Burivalova, J Garcia-Ulloa, L King. 2015. Conceptualizing forest degradation. *Trends in Ecology & Evolution* 30(10). Consultado 10 oct. 2024. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.001>
- Gutiérrez H, R de la Vara. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. 2ª ed. México. The McGraw-Hill.
- Hosonuma N, M Herold, V De Sy, RS De Fries, M Brockhaus, L Verchot, A Angelsen, E Romijn. 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters* 7(4):1–12.
- Jackson Díaz G. 2022. Evaluación de la regeneración de un bosque adulto degradado del tipo forestal siempreverde sometido a distintos tratamientos silviculturales en la Cordillera de la Costa de Valdivia. Tesina Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 39 p.
- Kissinger G, M Herold, V De Sy. 2012. *Drivers of deforestation and forest degradation: a synthesis report for REDD+ policymakers*. Vancouver, Canada. Lexeme Consulting. Disponible en https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/66151/Drivers_of_deforestation_and_forest_degradation.pdf
- Lake PS. 2013. Resistance, resilience and restoration. *Ecological Management and Restoration* 14(1):20–24.
- Michailoff I. 1943. Zahlenmassiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. *Forstwissenschaftliches Centralblatt und Tharandter Forstliches Jahrbuch* 6:273–279.
- MMA. 2016. Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Santiago, Chile. Información para el Desarrollo Productivo Ltda. Informe Final. 142 p.

- Muñoz Sáez F, R Hasbún Zaror, D Alarcón Abarca. 2018. *Guía técnica para caracterizar bosques adultos del tipo forestal siempreverde degradados y de referencia en las regiones de Los Ríos y Los Lagos*. Concepción, Chile. Noviembre 2018.
- Nyland RD. 2016. *Silviculture: concepts and applications*. Long Grove, Illinois, USA. Waveland Press, Inc. 680 p.
- O'Hara KL. 2001. The silviculture of transformation—a commentary. *Forest Ecology and Management* 151:81–86.
- Ponce DB, PJ Donoso, C Salas-Eljatib. 2019. Índice de bosque adulto: una herramienta para evaluar estados de desarrollo de bosques nativos de tierras bajas del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)* 40(2):235–240. Disponible en <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000200235>
- Quirós D. 2001. Tratamientos silviculturales. In Louman B, D Quirós, M Nilsson eds. *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Turrialba, Costa Rica. CATIE. p. 132–153.
- Salas-Eljatib C, A Fuentes-Ramírez, PJ Donoso, C Matus, DP Soto. 2018. Crecimiento de bosques secundarios y adultos de *Nothofagus* en el centro-sur de Chile. In Donoso PJ, A Promis, DP Soto eds. *Silvicultura en bosques nativos: experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos*. Corvallis, Oregon, USA. College of Forestry, Oregon State University. p. 73–82.
- Salas-Eljatib C, P Real Hermosilla. 2023. Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte. In Donoso H P, A Promis B eds. *Silvicultura en bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelandia*. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones.
- Serrano-Molina JJ, D Delgado-Rodríguez, JP Morales. 2021. *Silvicultura de bosques secundarios y de bosques degradados: las intervenciones silvícolas para su manejo en Centroamérica*. Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- Shapiro SS, MB Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52:591–611.
- Stanturf JA, BJ Palik, MI Williams, RK Dumroese, P Madsen. 2014. Forest restoration paradigms. *Journal of Sustainable Forestry* 33:161–194.
- Thompson ID, B Mackey, S McNulty, A Mosseler. 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change. Technical Series No. 43. Montreal, Canada. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 67 p.
- Vásquez-Grandón A, PJ Donoso, V Gerding. 2018. Degradación de los bosques: concepto, proceso y estado — Un ejemplo de aplicación en bosques adultos nativos de Chile. In Donoso PJ, A Promis,

DP Soto eds. *Silvicultura en bosques nativos: experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos*. Valdivia, Chile. Imprenta América. p. 175–196.

Vásquez R. 2025. Comportamiento temporal de variables demográficas en el crecimiento de un bosque adulto siempreverde del centro-sur de Chile. Tesis Magíster en Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 92 p.

Vergara G, B Schlegel. 2017. Degradación forestal: enfoques conceptuales y sus implicancias para Chile. *Ciencia e Investigación Forestal (INFOR)* 23(3):73.

Weigandt M, S Varela, J Diez, ME Fernández, J Gyenge. 2019. Resiliencia y resistencia forestal en tiempos de cambio climático. INTA EEA Bariloche, IFAB (INTA-CONICET), Área Forestal; INTA Agencia de Extensión Rural Tandil, CONICET. Diciembre 2019.

7. ANEXOS

Anexo 1. Criterios para evaluar sanidad, forma y copa

SANIDAD	
1	Aparencia Sana
2	Sanidad Regular con porciones de fuste con problemas de sanidad
3	Con fuste mayoritariamente afectado por daño sanitario

FORMA	
1	Recto
2	Parcialmente sinuoso sobre la primera troza
3	Muy sinuoso

COPA	
1	Vigorosa a través de todas las direcciones
2	Parcialmente vigorosa entre un tercio y dos tercios de la circunferencia alrededor del fuste
3	Copa escasa en menos de un tercio de la circunferencia

Fuente: Donoso *et al.* (2018a)

Anexo 2. Variables dasométricas promedio y desviación estándar por especie y tratamiento en los años 2015 y 2021.

Tratamiento 1																		
Especie	Densidad (árboles/ha)				DAP (cm)		DMC (cm)		Área basal (m ² /ha)				Volumen (m ³ /ha)				Vi %	
	2015		2021		2015	2021	2015	2021	2015		2021		2015		2021		2015	2021
<i>E. cordifolia</i>	115	± 98	110	± 99	44,8	44,0	72,1	72,2	47,0	± 21,8	44,9	± 48,2	490,2	± 579,4	469,7	± 469,7	28	26
<i>A. punctatum</i>	365	± 222	370	± 241	23,4	24,1	30,2	29,5	25,0	± 0,0	26,5	± 22,9	208,6	± 185,2	221,8	± 221,8	27	28
<i>L. philippiana</i>	195	± 364	195	± 364	16,0	17,1	20,9	19,8	6,0	± 0,1	6,7	± 12,8	54,2	± 105,0	61,7	± 61,7	11	11
<i>G. avellana</i>	205	± 182	190	± 157	15,6	17,5	19,5	17,5	4,9	± 52,6	5,7	± 5,6	49,3	± 51,8	58,5	± 58,5	11	11
<i>L. sempervirens</i>	75	± 62	75	± 62	26,1	27,4	38,2	37,2	8,1	± 5,1	8,6	± 7,5	107,0	± 107,9	112,7	± 112,7	7	7
<i>L. dentata</i>	135	± 90	140	± 94	9,7	10,3	11,9	11,4	1,4	± 7,3	1,6	± 1,8	4,3	± 5,4	4,8	± 4,8	6	6
<i>R. spinosus</i>	65	± 91	40	± 57	7,3	8,3	8,6	7,6	0,3	± 11,5	0,2	± 0,4	0,7	± 1,0	0,5	± 0,5	3	2
<i>N. obliqua</i>	15	± 30	15	± 30	58,2	60,5	61,7	59,5	4,2	± 1,6	4,5	± 9,0	40,6	± 81,2	43,7	± 43,7	3	3
<i>W. trichosperma</i>	15	± 30	15	± 30	50,8	51,1	52,3	52,1	3,2	± 0,0	3,2	± 6,4	22,8	± 45,6	23,6	± 23,6	2	2
<i>P. saligna</i>	35	± 41	40	± 49	14,2	14,5	17,4	16,8	0,8	± 8,3	1,0	± 1,1	7,5	± 9,6	9,4	± 9,4	2	2
<i>P. Lingue</i>	15	± 30	15	± 30	22,8	25,2	28,6	25,9	0,8	± 1,6	1,0	± 1,9	18,7	± 37,4	20,4	± 20,4	1	1
<i>A. chilensis</i>	15	± 30	0	± -	6,7	0	0	6,8	0,1	± 0,9	0	± -	0,3	± 0,7	0	± -	1	0
<i>L. ferruginea</i>	5	± 10	5	± 10	7,0	9,6	9,6	7,0	0,0	± 0,4	0,0	± 0,1	0,0	± 0,1	0,1	± 0,1	0	0
<i>A. luma</i>	5	± 10	10	± 20	6,0	5,8	5,8	6,0	0,0	± 6,4	0,0	± 0,1	0,0	± 0,1	0,1	± 0,1	0	0
Total ± Ds	1260	± 513	1220	± 451	22,0	22,5	26,9	26,4	101,8	± 47,2	103,9	± 42,5	1004,3	± 509,3	1026,8	± 465,7	100	100

Tratamiento 2																		
Especie	Densidad (árboles/ha)				DAP (cm)		DMC (cm)		Área basal (m ² /ha)				Volumen (m ³ /ha)				Vi %	
	2015		2021		2015	2021	2015	2021	2015		2021		2015		2021		2015	2021
<i>A. punctatum</i>	365	± 246	375	± 241	31,2	32,2	39,1	37,8	41,0	± 32,0	45,0	± 36,0	357,5	± 288,5	394,0	± 325,9	56,7	56
<i>L. philippiana</i>	180	± 71	215	± 44	19,4	18,3	23,6	24,7	8,6	± 9,0	9,4	± 9,5	87,5	± 96,2	95,0	± 102,1	19,4	21
<i>W. trichosperma</i>	20	± 40	20	± 40	68,4	68,4	71,1	71,0	7,9	± 15,8	7,9	± 15,9	44,6	± 89,2	45,2	± 90,3	7,3	7
<i>E. cordifolia</i>	20	± 40	20	± 40	43,9	45,5	62,0	61,3	5,9	± 11,8	6,0	± 12,1	58,5	± 117,0	59,7	± 119,4	5,8	5
<i>L. sempervirens</i>	45	± 57	45	± 57	19,2	20,8	28,2	26,6	2,5	± 4,3	2,8	± 4,8	29,8	± 56,0	33,7	± 62,7	5,1	5
<i>P. saligna</i>	20	± 23	30	± 38	16,7	24,0	18,9	27,6	0,8	± 1,4	1,2	± 1,2	13,0	± 15,8	8,3	± 12,6	2,3	3
<i>G. avellana</i>	15	± 30	20	± 28	18,6	17,1	18,5	18,6	0,4	± 0,8	0,5	± 1,0	3,8	± 7,6	5,2	± 10,3	1,4	2
<i>L. dentata</i>	15	± 30	20	± 28	9,6	11,6	11,0	12,6	0,2	± 0,4	0,2	± 0,3	0,7	± 1,4	0,7	± 1,2	1,2	1
<i>R. spinosus</i>	10	± 12	5	± 10	8,3	13,1	13,1	8,7	0,1	± 0,1	0,1	± 0,1	0,1	± 0,2	0,2	± 0,3	0,8	0
Total ± Ds	690	± 217	750	± 245	26,1	27,9	31,7	32,1	67,5	± 22,4	73,2	± 24,0	595,4	± 174,9	642,0	± 183,6	100	100

Tratamiento 3																					
Especie	Densidad (árboles/ha)				DAP (cm)		DMC (cm)		Área basal (m²/ha)				Volumen (m³/ha)				Vi %				
	2015		2021		2015	2021	2015	2021	2015		2021		2015		2021		2015	2021			
<i>A. punctatum</i>	320	± 234	320	± 238	26,1	26,9	32,3	31,5	24,9	± 20,9	26,2	± 21,7	207,6	± 178,4	219,2	± 185,8	48	46			
<i>L. philippiana</i>	135	± 171	135	± 159	19,5	21,2	24,2	22,4	5,3	± 7,9	6,2	± 9,0	47,4	± 71,5	57,1	± 84,6	15	15			
<i>E. cordifolia</i>	80	± 63	105	± 102	25,6	22,0	29,3	32,1	6,5	± 9,0	7,1	± 9,3	55,6	± 79,6	60,6	± 83,0	12	14			
<i>N. obliqua</i>	15	± 19	15	± 19	67,7	70,9	86,2	84,1	8,3	± 14,3	8,8	± 14,8	80,5	± 138,0	84,7	± 141,9	10	9			
<i>L. sempervirens</i>	60	± 94	60	± 54	18,8	19,9	24,4	23,7	2,6	± 3,5	2,8	± 1,5	26,5	± 33,8	28,2	± 16,8	7	7			
<i>P. saligna</i>	55	± 85	55	± 85	10,9	12,7	13,1	11,3	0,6	± 1,0	0,7	± 1,3	3,9	± 7,0	5,7	± 10,0	4	4			
<i>G. avellana</i>	20	± 0	20	± 10	14,5	16,9	18,7	16,5	0,4	± 0,5	0,5	± 0,6	4,2	± 5,9	5,5	± 7,2	2	2			
<i>R. spinosus</i>	20	± 40	20	± 40	7,1	7,8	7,9	7,2	0,1	± 0,2	0,1	± 0,2	0,2	± 0,4	0,3	± 0,5	1	1			
<i>L. apiculata</i>	10	± 20	5	± 10	6,0	7,4	7,4	6,1	0,0	± 0,1	0,0	± 0,0	0,1	± 0,1	0,0	± 0,1	1	0			
<i>L. dentata</i>	5	± 10	10	± 28	5,0	5,1	5,1	5,0	0,0	± 0,0	0,0	± 0,3	0,0	± 0,0	0,0	± 1,2	0	1			
Total ± Ds	720	± 303	745	± 331	20,1	21,1	24,9	24,0	48,8	± 28,5	52,5	± 28,7	426,0	± 249,2	461,3	± 250,4	100	100			

Tratamiento 4																					
Especie	Densidad (árboles/ha)				DAP (cm)		DMC (cm)		Área basal (m²/ha)				Volumen (m³/ha)				Vi %				
	2015		2021		2015	2021	2015	2021	2015		2021		2015		2021		2015	2021			
<i>A. punctatum</i>	210	± 241	215	± 251	24,6	24,8	30,3	30,0	14,8	± 14,7	15,5	± 15,2	122,4	± 123,5	128,5	± 127,7	41	41			
<i>E. cordifolia</i>	70	± 115	65	± 105	28,2	31,5	41,9	39,0	8,4	± 9,7	9,0	± 10,4	76,6	± 88,4	82,6	± 95,4	18	18			
<i>L. philippiana</i>	100	± 187	105	± 197	18,4	19,1	27,5	26,9	5,7	± 6,8	6,2	± 7,4	59,5	± 76,7	64,9	± 81,3	18	19			
<i>N. obliqua</i>	10	± 12	10	± 12	86,0	87,7	88,8	87,3	6,0	± 7,7	6,2	± 7,8	57,8	± 74,0	59,9	± 75,5	8	8			
<i>L. dentata</i>	5	± 10	10	± 12	11,4	15,0	12,9	15,0	0,1	± 0,2	0,1	± 0,2	0,3	± 0,7	0,5	± 0,9	6	1			
<i>L. sempervirens</i>	40	± 28	40	± 34	27,9	32,0	39,6	36,9	4,3	± 4,9	4,9	± 5,5	55,4	± 76,6	62,9	± 83,9	4	10			
<i>P. saligna</i>	15	± 19	15	± 19	8,8	10,0	11,2	10,0	0,1	± 0,2	0,1	± 0,2	0,9	± 1,4	1,1	± 1,9	2	2			
<i>P. lingue</i>	5	± 10	5	± 10	19,0	35,0	19,0	35,0	0,5	± 1,0	0,1	± 0,3	9,7	± 19,4	6,4	± 12,7	1	1			
<i>R. spinosus</i>	5	± 10	5	± 10	6,0	6,5	6,5	6,0	0,0	± 0,0	0,0	± 0,0	0,0	± 0,1	0,0	± 0,1	1	1			
Total ± Ds	460	± 299	470	± 303	25,59	29,1	30,9	31,78	39,8	± 26	42,3	± 26,3	382,7	± 250,3	406,8	± 259,9	100	100			