

## Comparación de crecimiento de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en plantaciones puras y mixta en la depresión intermedia de la Región de Los Ríos, Chile

Comparing growth of *Nothofagus alpina* and *Nothofagus obliqua* in pure and mixed plantations in the intermediate depression of the Los Ríos Region, Chile

Tomás Riquelme-Buitano \*\*, Patricio F Ojeda González <sup>a</sup>, Pablo J Donoso <sup>a</sup>

\* Corresponding author: <sup>a</sup>Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Bosques y Sociedad, Laboratorio de Silvicultura, Valdivia, Chile, tomas.riquelme@uach.cl

### SUMMARY

In Chile, *Nothofagus* spp. is the main native tree genus grown in plantations. Data regarding growth in *Nothofagus* plantations have been reported for about three decades, and generally illustrate their high productive potential, especially if silvicultural management is carried out on time and established in appropriate places. The aim of this study was to measure the increases in diameter and height of *N. obliqua* and *N. alpina* in pure plantations and mixed plantations with both species, plus *N. dombeyi* and three mid-tolerant native species. These plantations are located close to each other, at 50 - 100 m a.s.l., each approximately 1 ha in size, both with southern exposure and the same soil type. They were between 24 - 26 years old when they were evaluated. In each plantation, dominant individuals were selected, and their neighboring competition (potentially available area, PAA), total height, and DBH were measured. An increment core was obtained from each individual to evaluate the increase in plantations over the last 6 years (PAI). The PAA of the species in each situation was not significantly different, as there was homogeneity in the competition conditions between individuals in the different plantations, which allowed for comparison of the increase between species according to condition. The total height, the DBH, and the PAI for each species were all significantly higher in the mixed plantation compared to the pure plantation, which is interpreted as a result of the combined effects of reducing competition and facilitation, in which the diversity of species plays a key role.

*Keywords:* facilitation, competition, afforestation.

### RESUMEN

En Chile las plantaciones con especies nativas se han realizado principalmente con *Nothofagus* spp. Desde hace unas tres décadas se reportan resultados sobre crecimiento en plantaciones de *Nothofagus* que en general ilustran un alto potencial productivo, especialmente si se realiza manejo silvícola oportuno y en sitios apropiados. En esa línea, este estudio tuvo como objetivo determinar los incrementos en diámetro y altura de *N. obliqua* y *N. alpina* en plantaciones puras y en una plantación mixta con ambas especies, más *N. dombeyi* y tres especies semitolerantes a la sombra. Las plantaciones se encuentran cercanas unas a otras, a 50 - 100 m s.n.m., cada una aproximadamente de 1 ha en exposición sur y sobre el mismo tipo de suelo. Tenían entre 24 - 26 años cuando se evaluaron. En cada plantación se seleccionaron individuos dominantes, y a cada uno se le midió su competencia vecina (área potencialmente aprovechable, APA), altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP), y se le extrajo un tarugo para evaluar el incremento de los últimos 6 años (IPA). El APA de las especies en cada situación no fue significativamente diferente, es decir, existió homogeneidad en las condiciones de competencia entre individuos en las distintas plantaciones, lo que permitió comparar el incremento entre las especies según condición. La altura total, el DAP y el IPA fueron significativamente mayores para cada especie en la plantación mixta en comparación a la plantación pura, lo cual se interpreta como resultado de los efectos combinados de reducción de la competencia y la facilitación, en que la diversidad de especies cumple un rol clave.

*Palabras clave:* facilitación, competencia, forestación.

### INTRODUCCIÓN

La demanda de madera ha incrementado y se proyectan significativos aumentos a futuro (FAO 2016), debido al crecimiento poblacional y a la necesidad de suprimir la dependencia de los combustibles fósiles al 2050, tanto para la generación de energía como para la producción de

materiales, y así alcanzar la neutralidad en las emisiones de carbono (Girardi *et al.* 2022). Chile es uno de los diez principales países del mundo en cuanto a superficie dedicada a plantaciones forestales (CONAF 2017). Sin embargo, el 93 % de esta superficie corresponde a plantaciones de especies exóticas y solo cerca de 6.500 ha corresponden a plantaciones de especies nativas, principalmente del gé-

nero *Nothofagus* (Salas *et al.* 2016). No obstante, el país posee una interesante superficie y diversidad de especies para implementar plantaciones mixtas con especies nativas de alto interés económico (Hildebrandt *et al.* 2010, Donoso y Soto 2010). En este sentido, las experiencias de plantaciones con especies nativas muestran resultados que indican un alto potencial productivo para *Nothofagus alpina* (Poepp. y Endl.) Oerst., *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst. y *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (Donoso *et al.* 2011, 2015a, Ojeda *et al.* 2020). Estas especies del género *Nothofagus* poseen características que promueven el desarrollo de plantaciones forestales, como sus altas tasas de crecimiento (Donoso y Soto 2010, Donoso *et al.* 2015a), madera de calidad (Hall y Witte 1998) y tasas de rendimiento financiero medianas a altas (Cubbage *et al.* 2007, Donoso *et al.* 2015a).

El modelo forestal chileno se ha desarrollado a través de plantaciones monoespecíficas de especies exóticas, bajo una lógica industrial centrada en la eficiencia (Lyle 1999, Donoso *et al.* 2015b). La expansión de estas plantaciones y el actual modelo productivo, basado en el establecimiento de forestaciones de grandes superficies y cosechas mediante extensas talas raso, ha generado repercusiones ambientales y sociales negativas que cuestionan la sostenibilidad del modelo actual de plantaciones (Salas *et al.* 2016, Heilmayr *et al.* 2020). Ante esto, la promoción de plantaciones con especies nativas emerge cada vez más como una necesidad para diversificar y hacer más sustentable al sector forestal de Chile. En este escenario, además, el desarrollo de plantaciones mixtas surge como una oportunidad a explorar por lo que significan en cuanto al aumento de la diversidad y, eventualmente, de la productividad al compararlas con las plantaciones puras. En este sentido, las investigaciones plantean que las plantaciones forestales mixtas resultan ventajosas cuando las combinaciones son apropiadas, resultando en productividades más altas que en plantaciones monoespecíficas (Kelty 2006, Pretzsch *et al.* 2012, 2016, 2017, Schnabel *et al.* 2019). Así, las plantaciones mixtas muestran mayor estabilidad del rodal, mayor resistencia contra plagas y enfermedades, reducción de la demanda de fertilizantes, aumento de hábitats para especies de vida silvestre, una mejora en la estética del paisaje e inclusive, mayor resistencia y resiliencia a los efectos del cambio climático (Chen y Popadiuek 2002, Pretzsch *et al.* 2012, Messier *et al.* 2021). Estos antecedentes, principalmente, han incentivado la implementación de plantaciones mixtas en general, y en Chile, se ha propuesto como una promisoriosa oportunidad para las especies nativas del género *Nothofagus* (Uteau y Donoso 2009, Donoso *et al.* 2011, 2015a, Ojeda *et al.* 2020). Por lo tanto, el hecho de que la diversidad pueda tener un efecto positivo en la productividad sugiere un cambio de paradigma fundamental en la gestión de los recursos naturales y de los bosques, contrastante con el modelo forestal industrial actual, entendiendo que sinergias positivas pueden surgir de las diversas interacciones ecológicas entre los componentes del ecosistema.

Según Kelty (1992) la productividad más alta que alcanzan los bosques y plantaciones mixtas se puede explicar mediante la “teoría de complementariedad de nicho”, a través de al menos uno o dos mecanismos: la complementariedad producto del uso diferenciado de los recursos (agua, luz y suelo) en el espacio o tiempo por parte de las distintas especies (Kelty 2006) y la facilitación, referida a la interacción positiva entre las especies, donde ciertas especies mejoran las condiciones ambientales para otras o suplen recursos críticos, como la disponibilidad de nitrógeno en el sitio mediante su fijación (Loreau y Hector 2001). Esta teoría indica que comunidades más diversas pueden ocupar el espacio limitado disponible en mejor medida mediante una mayor oferta, captura y eficiencia del uso de los recursos y, por lo tanto, los recursos disponibles son mejor utilizados que un monocultivo bajo las mismas condiciones (Pretzsch *et al.* 2017). Por consiguiente, la selección y distribución de las especies en las plantaciones mixtas serán claves para conseguir una mayor productividad del sistema o un mejor desarrollo de al menos algunas especies presentes.

De esta manera, el objetivo de este trabajo es aportar al conocimiento sobre plantaciones forestales mixtas con especies nativas a través de la determinación de los crecimientos individuales de especies de *Nothofagus* en tres plantaciones de la misma edad, pero con composición distinta: una plantación pura de *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst., una plantación pura de *Nothofagus alpina* (Poepp. & Endl.) Oerst. y una plantación mixta con diferentes especies nativas entre ellas *Nothofagus obliqua*, *Nothofagus alpina* y *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst. La hipótesis de esta investigación es que los individuos de las plantaciones mixtas pueden presentar mayores crecimientos que los de una plantación monoespecífica en condiciones similares producto de las sinergias derivadas de la mezcla.

## MÉTODOS

*Área de estudio.* Las plantaciones se encuentran dentro del predio particular “Chucaypulli”. Este predio consta de 70 hectáreas, y se ubica a 7 km al sudoeste de la localidad San José de La Mariquina, Región de Los Ríos (39° 31' 8" latitud sur y 73° 3' 19" longitud oeste, figura 1). El clima en la zona corresponde a templado cálido con menos de cuatro meses secos. Además, la zona se encuentra dentro de la denominada “cuenca o depresión de San José de la Mariquina”, que presenta cierta influencia mediterránea debido a la sombra del cordón occidental de la cordillera de la Costa. La temperatura media anual es de 11 °C, la precipitación media anual corresponde a 1.500 mm y se concentran en las estaciones de otoño-invierno (Flores 2006). El tipo de suelo corresponde a rojo arcilloso de origen volcánico antiguo, pertenecientes a la serie Pelchuquín, caracterizada por presentar suelos profundos de textura francolimosa y buen drenaje, favoreciendo el crecimiento de plantas (CI-REN 1999). La topografía del predio es de lomajes suaves,

la elevación aproximada es de 50 - 100 m s.n.m. (CIREN 1999) y los suelos presentan características homogéneas.

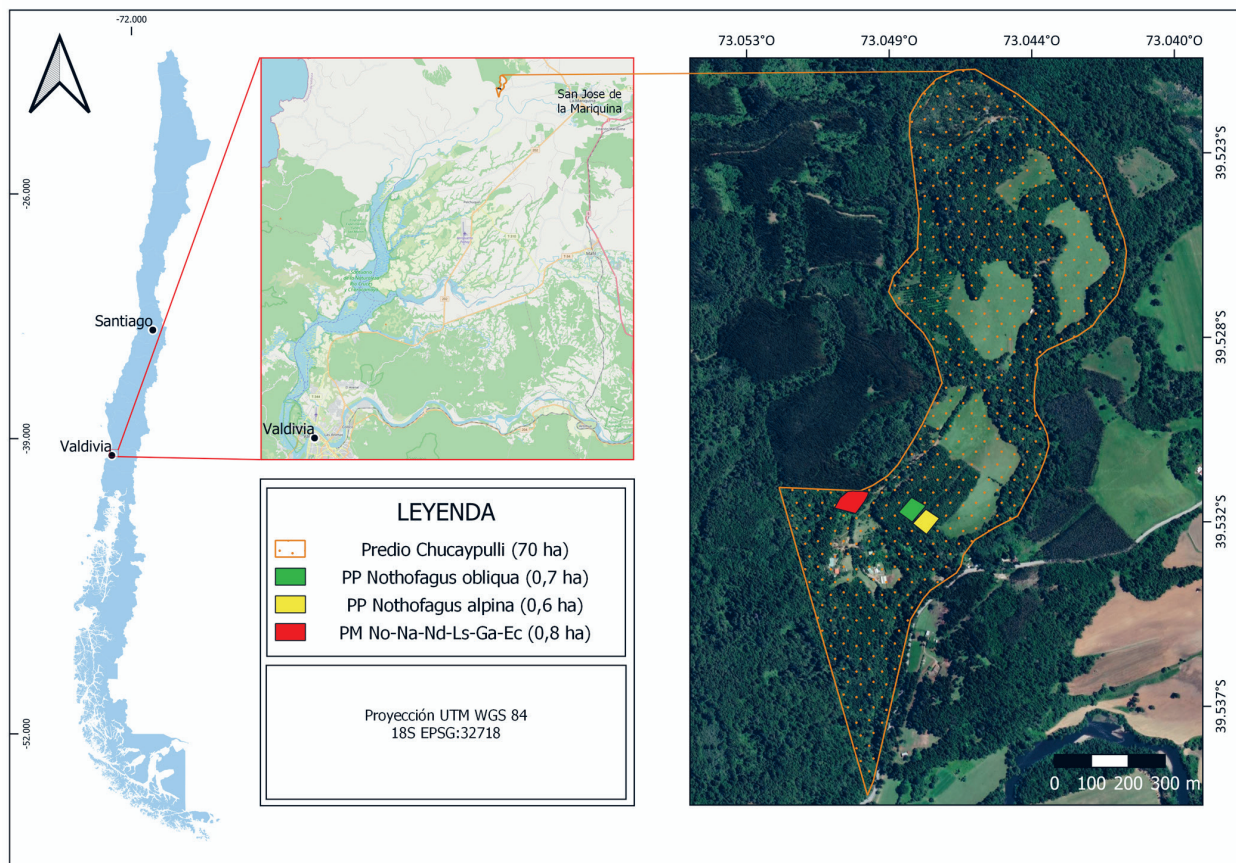
Se estudiaron tres plantaciones con una superficie similar de 1 ha; una plantación pura de roble (*Nothofagus obliqua*), una plantación pura de raulí (*Nothofagus alpina*) y una plantación mixta compuesta por seis especies, incluyendo *N. obliqua* y *N. alpina*. Las plantaciones puras fueron establecidas el año 1993 y la plantación mixta el año 1995, ambas con una densidad inicial de 2.500 individuos  $\text{ha}^{-1}$  y en exposición sur, con un distanciamiento medio de 2 x 2 m. Dentro de la plantación mixta, se encuentran las especies *Nothofagus obliqua*, *Nothofagus alpina*, *Nothofagus dombeyi*, *Laurelia sempervirens* (Ruiz et Pavón) Tul., *Eucryphia cordifolia* Cav. y *Gevuina avellana* (Molina), las cuales se dispusieron en 13 líneas puras de coihue intercaladas con 12 líneas de roble y raulí y, 12 líneas de las otras tres especies (figura 2). Todas las plantaciones han sido sometidas a cortas esporádicas sanitarias o de mejoramiento por parte del propietario, siguiendo las recomendaciones de uno de los autores de este trabajo (comunicación personal con PJD). Como consecuencia, debido a esas intervenciones y parcialmente de mortalidad natural, actualmente estas plantaciones tienen una densidad media de  $1.226 \pm 744$  individuos  $\text{ha}^{-1}$ , un área basal de  $26,5 \pm$

$1,8 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y un diámetro medio cuadrático a la altura del pecho de  $17,1 \pm 9,9$  cm.

**Medición de las plantaciones.** Para cada plantación se establecieron tres subparcelas circulares, con una superficie entre 200  $\text{m}^2$  y 400  $\text{m}^2$ . En la plantación de *N. obliqua* pura se determinaron tres parcelas con diferentes tamaños de radio variando entre 6,34 m 9,55 m y 12,70 m, correspondiente a superficies entre 200  $\text{m}^2$ , 300  $\text{m}^2$  y 400  $\text{m}^2$ , de acuerdo con la distribución de la plantación y evitando un posible efecto borde. Para la plantación de *N. alpina* puro y para la plantación mixta se establecieron tres subparcelas con un radio de 11,3 m correspondiente a una superficie de 400  $\text{m}^2$ .

En cada subparcela se midieron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 5 cm, considerando las siguientes variables: especie; DAP; posición sociológica según la clasificación de copas de Kraft (Donoso 1993); altura de dos árboles de las posiciones dominante, codominante e intermedio. Se excluyeron todos los árboles muertos y tocones antiguos.

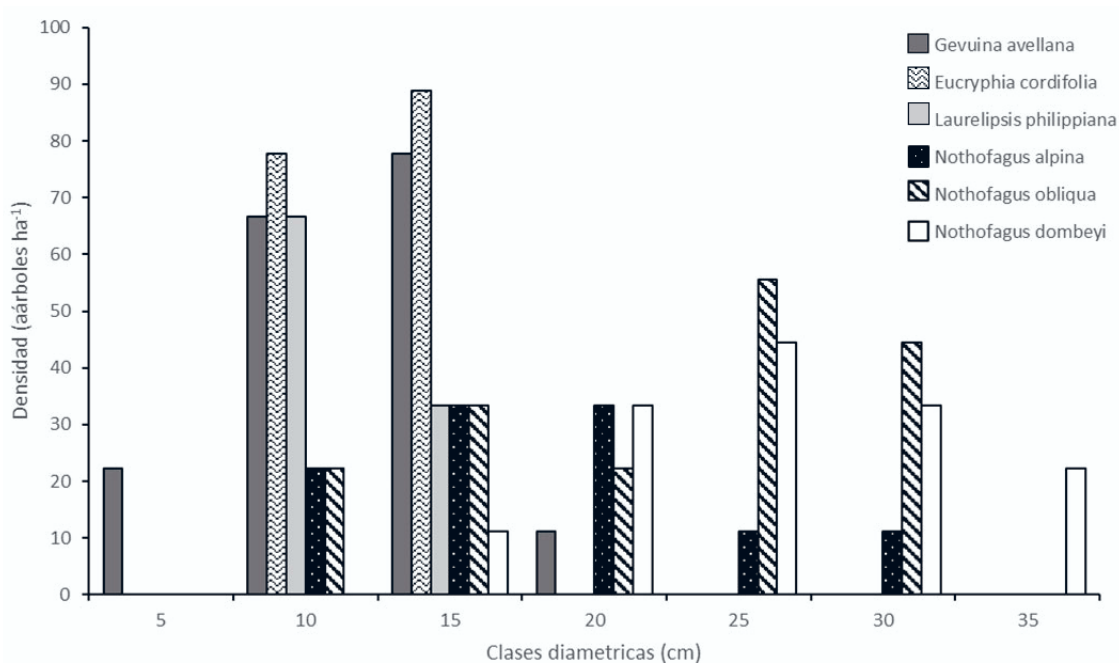
**Selección de árboles sujeto e índices de competencia y crecimiento.** Se comparó el desarrollo de los individuos dominantes de las especies *N. alpina* y *N. obliqua* dentro de las



**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio (predio Chucaypulli) y de las tres plantaciones evaluadas, en la región de Los Ríos.

Geographical location of the study area (Chucaypulli property) and the three evaluated plantations, in the Los Ríos region.





**Figura 2.** Distribución diamétrica de las especies de la plantación mixta.

Diameter distribution of species in the mixed plantation.

subparcelas en cada tipo de plantación. Se seleccionaron 26 árboles sujetos, 8 en cada plantación pura y 10 en la plantación mixta, cinco de *N. obliqua* y cinco de *N. alpina*. La selección de los árboles sujetos se produjo de acuerdo con los siguientes criterios: pertenecer a la posición dominante; compartir los mismos vecinos; mostrar un DAP sobre la media y tener una buena forma y sanidad. Para corroborar la homogeneidad de condiciones de competencia para los individuos de cada especie según condición de plantación, se evaluó la competencia puntual sobre cada árbol mediante el índice del área potencialmente aprovechable (APA) según Brown (1965). Este índice pertenece al grupo de índices de forma poligonal y determina el espacio que está a disposición para el crecimiento de un individuo relacionado a la competencia de los árboles vecinos. El APA es un polígono formado alrededor de un árbol sujeto (s) en que las líneas están compuestas por la relación entre la distancia y el diámetro de los árboles vecinos en comparación con el árbol sujeto según la siguiente fórmula (Uteau y Donoso 2009):

$$DP_{sc} = \frac{D_s^2}{(D_s^2 + D_c^2)} \times D_{sc} \quad [1]$$

Donde  $DP_{sc}$  es el punto medio entre el competidor y el sujeto,  $D_s$  es el diámetro a la altura del pecho (1,3 m; DAP) del árbol sujeto,  $D_c$  es el DAP del competidor, y  $D_{sc}$  es la distancia entre el árbol sujeto y el árbol competidor.

Por lo tanto, para cada cálculo del APA [1] se midió lo siguiente: la especie, la altura y el DAP del árbol su-

jeto, la especie y el DAP de todos los árboles vecinos, más la distancia y el azimut entre el sujeto y los árboles competidores. Posteriormente, los datos de distancia entre sujeto-competidor y azimut se utilizaron para establecer las ubicaciones de los individuos en un eje de coordenadas cartesianas utilizando una hoja de trabajo de Excel®. Luego, las coordenadas fueron insertadas en la hoja de diseño gráfico del software Auto-CAD® (v. 2015, Autodesk Inc., San Rafael, California, EUA) para estimar el área del polígono.

*Crecimiento diametral.* Para analizar el crecimiento diametral anual de los árboles en cada tipo de plantación se trabajó con los mismos individuos seleccionados como árboles sujetos en el análisis del APA [1]. Se extrajo un tarugo o testigo de madera a 1,3 m desde el suelo mediante barrenas de Pressler procurando que estos llegaran al centro del fuste. Transcurrido el tiempo de secado, los tarugos extraídos y montados se pulieron en el plano transversal del leño con lijadora orbital comenzando con lijas de granulometría gruesa (100 granos  $cm^{-2}$ ) hasta terminar con lijas de grano más fino (500  $g\ cm^{-2}$ ), con el fin de distinguir visualmente los límites de los anillos. Las muestras fueron escaneadas con un escáner Epson Expression 11000XL, Versión Itrax a 1200 DPI. Se midió el ancho de los anillos de todas las muestras con el software CooRecorder versión 9.6 (Larsson 2013). A cada anillo se le asignó el año calendario correspondiente al año en que comenzó su crecimiento, que corresponde al período de primavera según la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur.

A partir de las series de crecimiento obtenidas, se calculó el incremento corriente anual (ICA), el incremento medio anual (IMA) y el incremento periódico anual (IPA) del diámetro. El ICA corresponde al crecimiento diametral producido cada año por los árboles de la plantación. El IMA es la media del crecimiento en diámetro total a cierta edad de un árbol, y el IPA es el crecimiento en diámetro de los árboles en un periodo de tiempo específico, en este caso 6 años.

**Análisis estadístico.** El APA de los individuos sujeto de las subparcelas en las tres plantaciones fue evaluado mediante un análisis de varianza (ANOVA). Para ello se comparó el comportamiento de las especies de *Nothofagus* en condición pura y mixta. Además, se realizó la evaluación de supuestos, donde se chequeó que los residuales del modelo lineal estadístico entre las especies de *Nothofagus* en condición pura y mixta siguieran una distribución de Gauss (o normal) mediante la prueba de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk. También se corroboró que exista homocedasticidad de la varianza de los residuales mediante la prueba de Levene. Para identificar diferencias estadísticas significativas en el APA de los individuos dominantes en cada modelo de plantación, se aplicó la prueba estadística de T. Se utilizó el mismo análisis estadístico para identificar diferencias en el IPA de los individuos dominantes de cada especie para el período 2013 - 2018 en cada situación. Para determinar si existe un efecto significativo sobre el crecimiento en diámetro y altura de los individuos dominantes de cada especie según plantación, se incluyó a los análisis estadísticos anteriores la prueba de comparaciones múltiples posthoc de Tukey. Para todas las pruebas estadísticas se consideró un nivel de significancia de  $\alpha \leq 0.05$ . Los análisis estadísticos fueron realizados a través del paquete "agricolae" (De Mendiburu 2010) mediante el software estadístico R (R Core Team 2020).

## RESULTADOS

Los individuos sujetos evaluados de cada especie de *Nothofagus* no presentaron diferencias significativas a nivel de competencia puntual ( $P \geq 0,05$ ; figura 3A). Este resultado fue importante para hacer viable la comparación del crecimiento, pues indica condiciones similares de APA ( $m^2$ ) con los árboles vecinos en cada una de las plantaciones estudiadas.

Se observaron diferencias significativas en el IPA para el período 2013-2018 ( $P \leq 0,05$ ; figura 3B) entre los individuos dominantes de *N. obliqua* que, en condición mixta, presentaron valores medios de 0,16 cm en diámetro y, en condición pura, 0,07 cm. Por otro lado, el IPA de *N. alpina* entre condición mixta y pura no presentaron diferencias significativas ( $P \geq 0,05$ ), con incrementos de 0,15 cm y 0,11 cm en diámetro, respectivamente.

En cuanto a la altura entre los individuos dominantes de las plantaciones de *N. alpina* y *N. obliqua* en condición mixta y condición pura se observaron diferencias signifi-

cativas. Específicamente, existieron diferencias entre los individuos evaluados de *N. alpina* en condición pura y mixta y entre los individuos de *N. obliqua* puro y mixto (figura 3C). Los individuos de *N. alpina* en condición pura presentaron una media de altura de 22,5 m mientras que en condición mixta alcanzaron 26,9 m. En cuanto a los individuos de *N. obliqua*, en condición pura alcanzaron una media de 24,1 m mientras que en condición mixta alcanzaron 28,7 m de altura (figura 3C).

Respecto al crecimiento en DAP acumulado al año 2018, se evidenciaron diferencias entre las especies y los modelos de plantación en que se encontraban, pero solo fueron significativas para *N. obliqua*. En la plantación mixta, *N. obliqua* presentó un DAP acumulado al año 2018 de 25,2 cm, mientras que en plantación pura la especie presentó un DAP acumulado de 19,8 cm. Por otro lado, al año 2018 *N. alpina* tuvo un DAP de 24,1 cm, mientras que en condición pura la especie presentó un DAP acumulado de 21 cm (figura 3D).

Se observó que en ambas especies el crecimiento acumulado al año 2018 en la condición mixta es superior al de la condición pura (figura 3C y 3D). Además, se obtuvieron diferencias significativas en los incrementos corrientes anuales entre las especies según el tipo de plantación (cuadro 1). Específicamente, se obtuvo que *N. alpina* tuvo un ICA significativamente superior en la condición mixta que la condición pura, con crecimientos medios de 1,06 cm y 0,78 cm anuales, respectivamente. Los mismos resultados se presentaron para *N. obliqua*, que tuvo mayor ICA en condición mixta que en la pura, con 1,12 cm y 0,71 cm anuales, respectivamente. En este sentido, durante el período 1996 a 2002 aproximadamente, se alcanzan las mayores diferencias de ICA entre la plantación mixta respecto de las plantaciones puras, con valores de crecimiento diametral cercanos a 1,8 cm para ambas especies de *Nothofagus*. En condición pura, los individuos se mantienen con un ICA inferior a 1 cm aproximadamente en promedio (figura 4).

## DISCUSIÓN

Una de las interrogantes de este estudio fue si el cre-

**Cuadro 1.** Incrementos corrientes anuales promedio en diámetro para los individuos sujeto medidos en cada una de las plantaciones (<sup>a</sup> y <sup>b</sup> indican diferencias significativas \* =  $P \leq 0,05$ ).

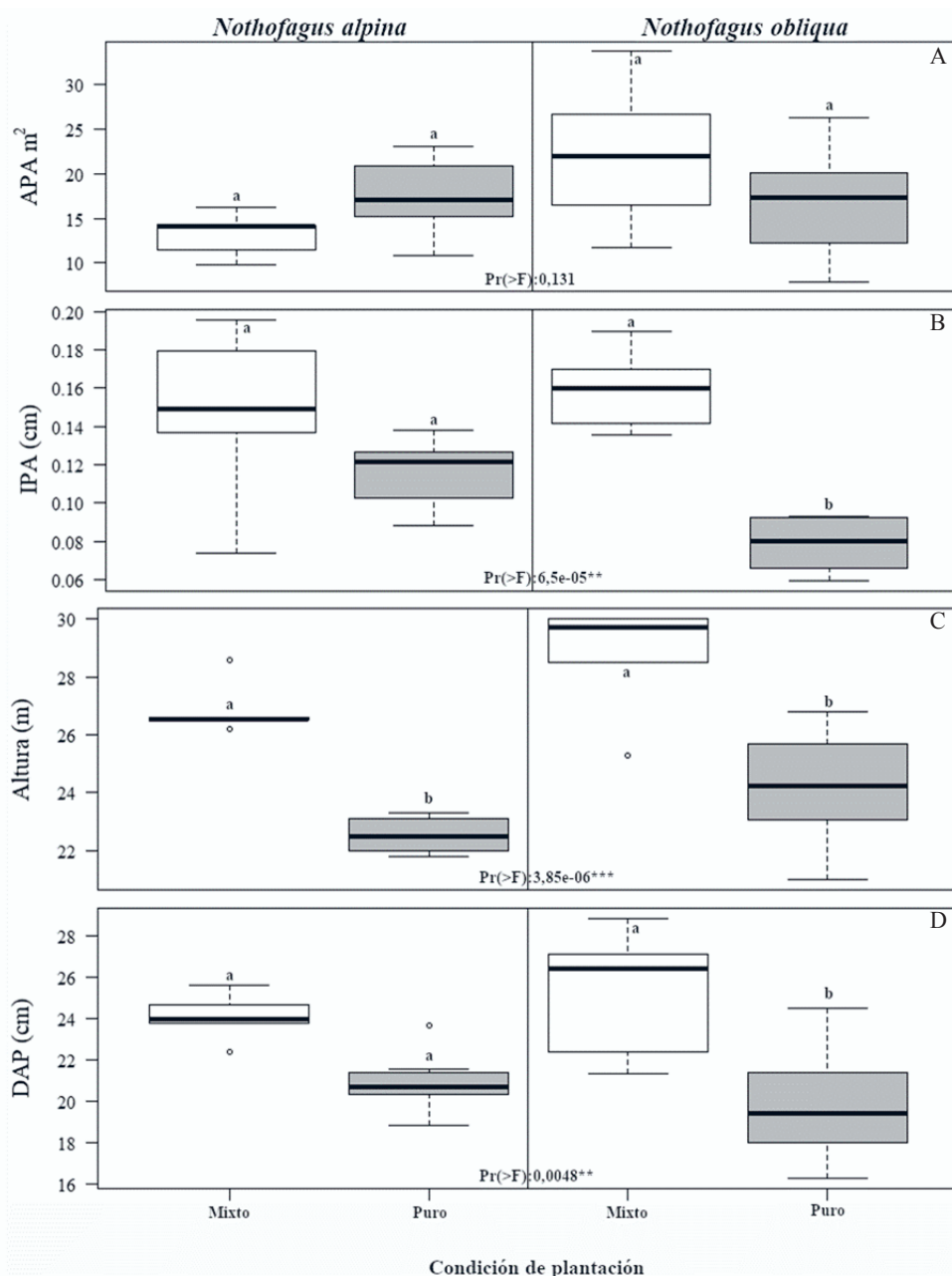
Current average annual increases in diameter for the target individuals measured in each of the plantations (<sup>a</sup> and <sup>b</sup> indicate significant differences \* =  $P \leq 0.05$ ).

Condición de plantación	ICA medio (cm)
<i>N. alpina</i> puro	0,78 <sup>a</sup>
<i>N. alpina</i> mixto	1,06 <sup>b</sup>
<i>N. obliqua</i> puro	0,71 <sup>a</sup>
<i>N. obliqua</i> mixto	1,12 <sup>b</sup>

cimiento de *Nothofagus obliqua* y de *Nothofagus alpina* en la plantación mixta es mayor que en las plantaciones monoespecíficas de cada una de estas especies. Como las tres plantaciones comparadas se ubican en un sitio de muy similares características en cuanto a suelo, clima y exposición, y no presentaron diferencias significativas entre el APA de los árboles dominantes, se puede señalar que las

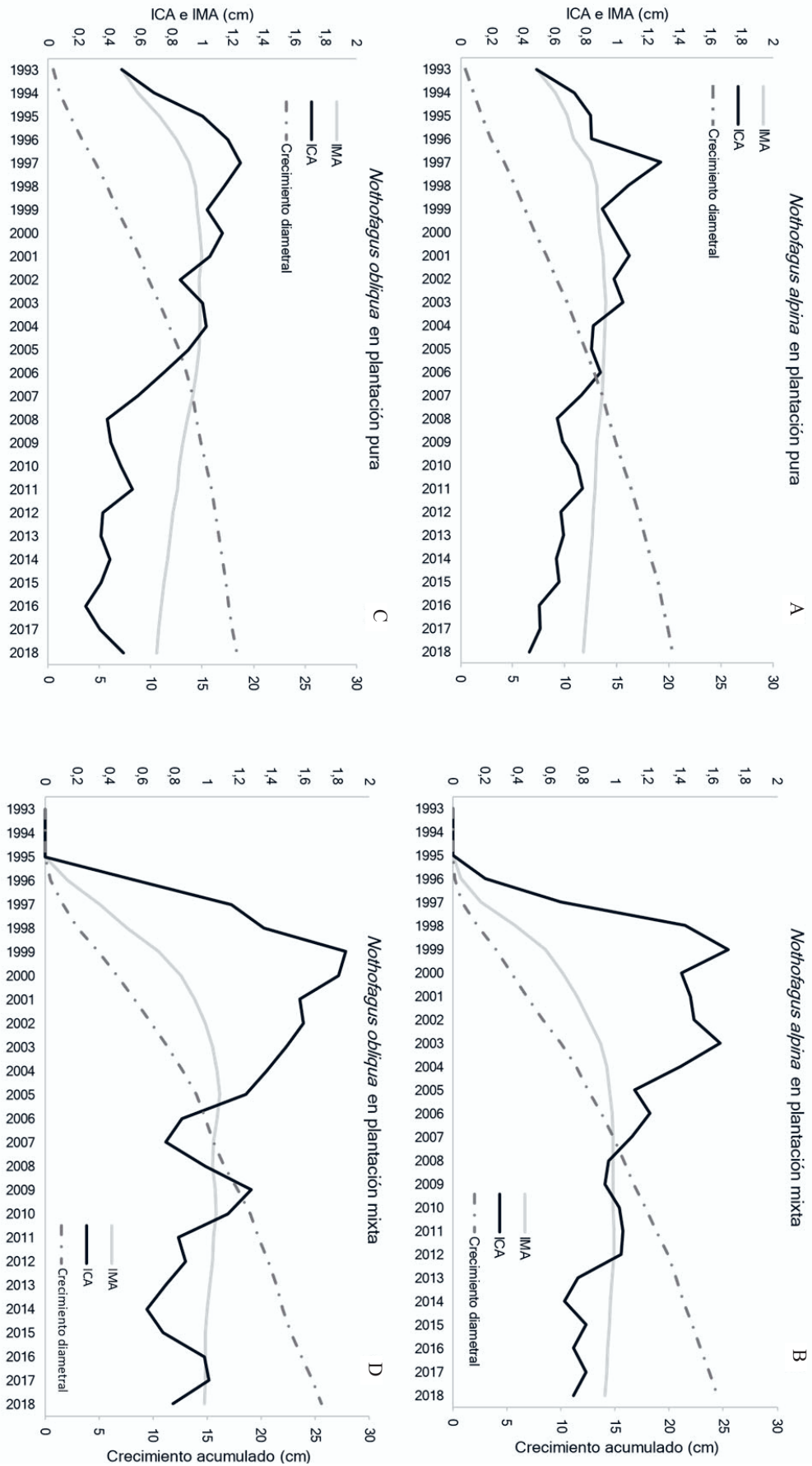
diferencias observadas en cuanto a altura, diámetro e incrementos de los árboles sujeto en los distintos modelos de plantación obedecen a factores distintos a la competencia puntual.

De esta manera, el efecto de complementariedad entre individuos del rodal mixto es una causa plausible para explicar las diferencias entre los crecimientos de los árbo-



**Figura 3.** Área potencialmente aprovechable (APA) (m<sup>2</sup>) (A), incremento periódico anual (IPA) (B), altura total (m) (C) y diámetro a la altura del pecho (DAP) (cm) (D), según especie (*Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua*) y condición de plantación (mixta y pura). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre condiciones de plantación ( $P \leq 0,05$ ).

Potentially available area (PAA) (m<sup>2</sup>) (A), periodic annual increment (PAI) (B), total height (m) (C) and diameter at breast height (DBH) (cm) (D), according to species (*Nothofagus alpina* and *Nothofagus obliqua*) and planting condition (mixed and pure). Different letters indicate statistically significant differences between planting conditions ( $P \leq 0.05$ ).



**Figura 4.** Crecimiento acumulado, incremento medio anual (IMA, cm) e incremento corriente anual (ICA, cm) en diámetro a la altura del pecho (DAP), de las plantaciones puras y mixta de *Nothofagus* en el predio Chucaypulli. En el eje de las x se indica la estación de primavera de cada año, período en que se inicia la temporada de crecimiento hasta el verano del año siguiente. Cumulative growth, mean annual increment (MAI, cm) and current annual increment (CAI, cm) in diameter at breast height (DBH), of the pure and mixed *Nothofagus* plantations in the Chucaypulli farm. The x-axis indicates the spring season of each year, the period from which the growing season begins until the summer of the following year.



les dominantes evaluados en cada plantación. La complementariedad se define como los efectos combinados de la reducción de la competencia (o diferenciación de nichos) y la facilitación (Loreau y Hector 2001). En este sentido, la protección parcial otorgada por los individuos de *N. dombeyi* (figura 2) sobre las restantes especies, debido a su follaje de carácter perenne y mayores tasas de crecimiento, sería el factor que facilita el crecimiento de los demás *Nothofagus* en condición mixta, mediante la protección a la radiación directa y la reducción de las tasas de evapotranspiración en períodos secos durante la temporada de crecimiento (Donoso *et al.* 2011, Ojeda *et al.* 2020). Además, *N. dombeyi* no solo tiene una fenología distinta a *N. alpina* y *N. obliqua*, sino que tiene una raíz superficial, a diferencia de las raíces profundas de las otras dos especies de *Nothofagus* (Donoso 2006, Ojeda *et al.* 2020), permitiendo la estratificación de las raíces y, por lo tanto, complementariedad en el uso de recursos (Kely 2006).

En el caso de las plantaciones puras para ambas especies de *Nothofagus*, los individuos han estado sometidos a mayor competencia intraespecífica durante sus vidas, a diferencia de lo ocurrido en la plantación mixta, donde los *Nothofagus* fueron plantados junto a especies de distintos requerimientos nutricionales y lumínicos, así como crecimientos inferiores. En este sentido, en la plantación mixta los individuos de *N. obliqua* y *N. alpina* crecieron con la protección del follaje perenne de *N. dombeyi* y, posteriormente, sufrieron menor competencia intraespecífica por la configuración de la plantación que incluyó especies semitolerantes con tasas de crecimiento menores, como sucede con *Eucryphia cordifolia*, *Gevuina avellana* y *Laurelia sempervirens*. Las diferencias tanto en los crecimientos máximos como en la media de crecimiento en diámetro de *N. alpina* y *N. obliqua* en la plantación mixta y en las plantaciones puras, ilustran una dinámica del crecimiento diferente (figura 4). Si bien en todas las plantaciones el crecimiento máximo en diámetro de los árboles dominantes se logra al cuarto año de establecidas las plantaciones, es decir antes del cierre de copas, y se mantiene cercano a ese máximo por 4 a 6 años, en la plantación mixta este crecimiento máximo es cercano a los 2 cm, mientras que en las plantaciones puras es levemente superior a 1 cm. En consecuencia, los valores relativamente altos en crecimiento que se prolongan por algunos años son también menores en las plantaciones puras, y ello determina que ya al año 10 los árboles dominantes de *N. obliqua* y *N. alpina* en la plantación mixta superen en más de 2 cm a los árboles dominantes de estas especies en las plantaciones puras. En altura tal vez haya ocurrido algo similar. De hecho, para cuando las plantaciones tenían solo 10 años, Flores (2006) determinó que el crecimiento en altura de raulí en la plantación mixta era significativamente mayor que en la plantación pura.

El máximo crecimiento anual en diámetro en plantaciones de *Nothofagus* efectivamente ocurre entre los años 4 a 6 (Donoso *et al.* 2015a), y luego empieza a declinar

cuando comienza gradualmente el cierre de copas y aumenta la competencia por luz, y probablemente también la competencia radicular. Sin embargo, las altas tasas de crecimiento en diámetro se mantuvieron por un tiempo más prolongado en la plantación mixta (sobre 1 cm hasta los 15 años para ambas especies), lo cual puede obedecer a que la competencia entre individuos fue menor, especialmente durante ese tiempo en la plantación mixta, debido a la estratificación generada por el crecimiento diferencial de especies de distintas tolerancias a la sombra, a las diferencias en el tipo de raíces, y de otras características autoecológicas (Donoso 2006). En este sentido, es posible que una menor densidad de árboles que compiten en el estrato dominante con las especies objetivo resulte en tasas de crecimiento mayores, razón por la cual la plantación mixta presenta mayor crecimiento radial acumulado en las especies de *Nothofagus*, que en las plantaciones puras de estas especies. Esto sugiere entonces que el inicio de la competencia en la plantación mixta se difiere en el tiempo debido a la estratificación, que distancia las copas y, como se señaló, genera un microclima más favorable. Por lo tanto, mientras que un raleo puede ser necesario en las plantaciones puras antes de los 10 años (Donoso *et al.* 2015a), en la mixta este podría esperar, a menos que sea especialmente para controlar la densidad de *N. dombeyi* y evitar que suprima a los individuos de otras especies debido a su rápido crecimiento.

Adicionalmente, el microclima de la plantación mixta, que al momento del estudio se encontraba altamente estratificada (figura 2), ha de ser diferente al microclima de la plantación pura, con temperaturas más moderadas y humedad más alta producto de la composición de especies y estructura. En este sentido, el crecimiento diametral menor de las plantaciones monoespecíficas respecto de la mixta en períodos secos, como el registrado durante los años 1998 y 1999 (González-Reyes y Muñoz 2013), sugiere condiciones de microclima menos desfavorables en la plantación mixta durante épocas secas, lo que en un sitio como el de este estudio, en la depresión intermedia, con altas temperaturas y períodos secos de verano (CEA 2006), podría ser relevante en cuanto a mejorar las condiciones de micrositio en plantaciones mixtas vs. puras. Además, estas condiciones podrían otorgar mayor resiliencia y tolerancia frente a eventos o condiciones generales de mayor sequía a las plantaciones mixtas, especialmente considerando las tendencias constantes de disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas máximas en la zona (Garreaud *et al.* 2013, Boisier *et al.* 2018). Este es un tema interesante de explorar, así como el de la dinámica de la hojarazca y del suelo en plantaciones mixtas versus puras.

Se hace necesario, en consecuencia, comparar plantaciones puras y mixtas no solo en diferentes sitios y mezclas, sino que también para diferentes esquemas de manejo, especialmente en relación con la intensidad y periodicidad de raleos en estos, la cual podría diferir de aquella propuesta por Donoso *et al.* (2015a) para planta-



ciones puras. En este sentido, hasta la fecha las diferentes plantaciones mixtas en que se han observado efectos de facilitación o complementariedad que han favorecido el crecimiento de *N. alpina* o *N. obliqua* han incluido a *N. dombeyi* (Donoso *et al.* 2011, Ojeda *et al.* 2020), especie que tiene un crecimiento más rápido que las anteriores y que estaría cumpliendo un rol fundamental en mejorar el crecimiento de las especies componentes de la plantación, al menos de los otros *Nothofagus*.

## CONCLUSIONES

La aplicación de sistemas silviculturales mixtos, con énfasis en especies nativas del bosque chileno de rápido crecimiento como *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina*, se presenta como una opción viable para la actividad forestal del país, pero ello está fuertemente sujeto al diseño y manejo de estas plantaciones. En este sentido, el esquema de plantación mixta planteado en este trabajo conforma una propuesta de manejo concreta que produce efectos positivos en el crecimiento de especies de alto valor comercial, logrando alcanzar diámetros objetivo en menor tiempo, reduciendo así la edad de rotación, aumentando la rentabilidad de las plantaciones nativas y, haciéndolas más competitivas en el mercado nacional e internacional.

Este estudio, junto a otros anteriores, sugiere que las plantaciones mixtas pueden mejorar la producción potencial del sitio, ya que utilizan más eficientemente los recursos (agua, luz y nutrientes) debido a efectos de complementariedad de nichos y facilitación. En consecuencia, las investigaciones futuras deberían focalizarse en los diseños, mezclas de especies y manejo cultural que debieran aplicarse.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

TRB, POG y PDH desarrollaron la idea el año 2018 en una visita al predio Chucaypulli. TRB tomó los datos en terreno, realizó el análisis estadístico de los datos, escribió y editó el manuscrito. POG colaboró significativamente en el análisis estadístico y en la toma de datos en terreno. PDH orientó la investigación, revisó y editó el manuscrito.

## FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado a través de la Escuela de Graduados de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile, en el contexto del curso de Silvicultura de Bosques Naturales Mixtos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Jakob Albrecht y Amelie Hager, estudiantes del Magister en Cs. Mención Bosques y Medio Ambiente de la Universidad Austral de Chile, por su colaboración en toda la investigación. También se agradece a los revisores anónimos por las constructivas sugerencias.

## REFERENCIAS

- Boisier JP, C Álvarez-Garretón, RR Cordero, A Damiani, L Gallardo, R Garraud. 2018. Anthropogenic drying in Central-Southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Science of the Anthropocene* 6: 74. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Brown GS. 1965. Point density in Stems Per Acre. Eds Forest Research Institute, New Zealand Forest Service. 11p. (Research notes N° 38).
- Chen HYH, RV Popadieu. 2002. Dynamics of North American boreal mixedwoods. *Environmental Reviews* 10: 137–166.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 1999. Descripciones de suelos materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la Provincia de Valdivia - X Región. *Publicación CIREN*. Santiago, Chile. 196 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2017. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios y actualizaciones al año 2017, CONAF, Departamento Monitoreo de Ecosistemas Forestales. Santiago, Chile. 35 p.
- Cubbage F, P MacDonagh, J Júnior Sawinski, R Rubilar, PJ Donoso, A Ferreira, V Hoefflich, V Morales, G Ferreira, G Balmelli, J Siry, N Báez, J Alvarez. 2007. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. *New Forest* 33(3), 237-255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9025-4>
- De Mendiburu, F. 2010. *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research*. R package versión 1.0-9. Consultado 18 jul. 2022. Disponible en: <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Donoso C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina; Variación, estructura y dinámica. Ed. Universitaria. Santiago Chile. 483 p
- Donoso C. 2006. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones..
- Donoso PJ, C Navarro, DS Soto, V Gerding, O Thiers, E Pinares, B Escobar, MJ Sanhueza. 2015a. Manual de plantaciones de raulí (*Nothofagus alpina*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*) en Chile. Universidad Católica de Temuco. Temuco, Chile. 203 p.
- Donoso P, R Mujica Hoefelmayer, R Reyes Gallardo, J Romero. 2015b. Precedentes y efectos del neoliberalismo en el sector forestal chileno y transición hacia un nuevo modelo. In Pinol Bazzi A ed. *Democracia versus Neoliberalismo*, 25 años de neoliberalismo en Chile. Santiago, Chile. 352 p.
- Donoso PJ y DP Soto. 2010. Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Bosque* 47: 10-17.
- Donoso PJ, AA Muñoz, O Thiers, DP Soto, C Donoso. 2011. Effects of aspect and type of competition on the early performance of *Nothofagus dombeyi* and *Nothofagus nervosa* in a mixed plantation. *Canadian journal of forest research*, 41(5): 1075-1081. DOI: <https://doi.org/10.1139/x11-019>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2016. 2°ed. *Global Forest Resources Assessment 2015*. How are the world's forests changing? Online report. Consultado 20 nov. 2022. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>

- Flores MA. 2006. Crecimiento y calidad de plantaciones de *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil. en distintas exposiciones y situaciones de competencia en la Provincia de Valdivia. Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile. Valdivia. 50 p.
- Forrester DI. 2017. Ecological and physiological processes in mixed versus monospecific stands. In Pretzsch H, DI Forrester, J Bauhus eds. Mixed-species forests Springer. Berlin, Germany. p. 73-115.
- Garreaud R, P López, M Minvielle, M Rojas. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate* 26: 215–230. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Girardi Lavín G, M Hoehn, M Amar, D Vásquez, J Walker. 2022. Chile tiene Futuro desde sus Territorios. Ediciones Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- González-Reyes Á, AA Muñoz. 2013. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque* 34(2): 200-213. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000200008>.
- Hall M, M Witte. 1998. Maderas del sur de Chile. Santiago, Chile. Instituto de Educación Rural Ediciones. 92 p.
- Heilmayr R, C Echeverría, EF Lambin. 2020. Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nat Sustain* 3, 701–709. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0547-0>
- Hildebrandt P, P Kirchlechner, A Hahn, T Knoke, R Mujica. 2010. Mixed species plantations in Southern Chile and the risk of timber price fluctuation. *European Journal of Forest Research* 129(5): 935-946. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0284-4>
- Kelty MJ. 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In Kelty MJ, BC Larson, CS Oliver eds. The Ecology and Silviculture of Mixed-species Forests. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. p. 125-141.
- Kelty MJ. 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest Ecology and Management* 233: 195-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.011>
- Larsson L. 2013. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 9.6. Consultado 23 nov. 2022. Disponible en: <http://www.cybis.se/forfun/dendro/>
- Loreau M, A Hector 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature* 412:72–76
- Lyle JT. 1999. Design for human ecosystems. Landscape, land use, and natural resources. USA: Island Press.
- Messier C, J Bauhus, R Sousa-Silva, H Auge, L Baeten, N Barsoum, H Bruelheide, B Caldwell, J Cavender-Bares, E Dhiedt, N Eisenhauer, G Ganad, D Gravel, J Guillemot, JS Hall, A Hector, B Hérault, H Jactel, J Koricheva, H Kreft, S Mereu, B Muys, CA Nock, A Paquette, JD Parker, MP Perring, Q Ponette, C Potvin, PB Reich, M Scherer-Lorenzen, F Schnabel, K Verheyen, M Weih, M Wollni, DC Zemp. 2021. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests!. *Conservation Letters* e12829. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12829>
- Ojeda-González P, PJ Donoso, A Erlwein. 2020. Synergy in mixed *Nothofagus* spp. plantations: the effect of deciduous/evergreen neighbourhood on tree growth in the Chilean Andes. *New Zealand Journal of Forestry Science* 50. DOI: <https://doi.org/10.33494/nzjfs502020x102x>
- Pretzsch H, G Schütze y E Uhl 2012. Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15: 483-495. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>
- Pretzsch H, M del Rio, G Schütze, C Ammer, A Bravo-Oviedo. 2016. Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability. *Forest Ecology and Management* 373:149–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.043>
- Pretzsch H, DI Forrester, J Bauhus. 2017. Mixed-species forests, Ecology and Management. Berlin, Germany. Springer. 653 p.
- R Core Team 2020. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Salas C, PJ Donoso, R Vargas, CA Arriagada, R Pedraza, DP Soto. 2016. The forest sector in Chile: an overview and current challenges. *Journal of Forestry* 114(5): 562-571. DOI: <https://doi.org/10.5849/jof.14-062>
- Schnabel F, J Schwarz, A Danescu, C Fichtner, CA Nock, J Bauhus y C Potvin. 2019. Drivers of productivity and its temporal stability in a tropical tree diversity experiment. *Global Change Biology* 25(12): 4257- 4272. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14792>
- Schulman E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. Dendroclimatic changes in semiarid America. Tucson, AZ, USA. University of Arizona Press. 142 p.
- Uteau D, PJ Donoso. 2009: Early individual growth of *Eucryphia cordifolia* and *Laurelia sempervirens* planted under different competition conditions in southcentral Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 6(1):85-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202009000100008>

Recibido: 23.08.22

Aceptado: 13.03.23