



ARTÍCULO

Evaluación económica de bosques seminaturales de roble y pino oregón: Estudio de caso en una empresa agrícola-forestal de mediana propiedad en el centro-sur de Chile

Burkhard Müller-Using^{1*}; Helmut Keim²; Sabine Müller-Using³

¹ Ing. Forestal, Dr. Forest. Renovales Müller-Using Ltda, Panguipulli. burkhardmusing@yahoo.de

² Ing. Forestal. Pitideo Ltda, Villarrica. hkeimschilling@gmail.com

³ Ing. Forestal, Dr. Forest. Instituto Forestal, Sede Los Ríos. Valdivia. Chile. smuller@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.568>

Recibido: 16.08.2022; Aceptado 28.10.2022

RESUMEN

Se analiza económicamente el efecto de enriquecer mediante plantación suplementaria de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) a un latizal de roble (*Nothofagus obliqua*), utilizando como base los resultados de un estudio silvícola realizado en la Comuna de Máfil, Región de Los Ríos, Chile. Tomando como referencia un robledal de 60 años de edad, con un segundo estrato de pino oregón de 26 años, se elaboró un modelo del desarrollo de este bosque mixto, desde la plantación del pino oregón hasta una supuesta cosecha de ambas especies a los 80 años del roble y 46 del pino. En comparación con esta simulación, se analizó un robledal puro, usando un Diagrama de Manejo de Densidad como referencia para su desarrollo. Se demuestra así, que el bosque mixto logra tasas internas de retorno (TIR) notablemente más altas que el bosque puro de roble, cuando se deja crecer el estrato de la conífera por más de 35 años. El enriquecimiento es más eficiente mientras menor es la calidad del latizal al momento de establecer el pino oregón. La TIR del bosque mixto a la edad de 80/46 años, de roble y pino respectivamente, fue de 11,2%, donde pino oregón representa un 7,8%. En el bosque puro de roble, la TIR culminó a los 60 años (5,1%) y bajó a 3,4% a la edad de 80 años. En la mezcla estudiada el crecimiento aditivo es unilateral, es decir se ve enriquecido el roble por el pino oregón, pero no al revés.

Palabras Clave: *Nothofagus obliqua*, *Pseudotsuga menziesii*, manejo en dos estratos, evaluación económica, crecimiento aditivo.

SUMMARY

The effect of enriching an roble (*Nothofagus obliqua*) stand by supplementary planting of Oregon pine (*Pseudotsuga menziesii*) is analyzed economically, using as a basis the results of a silvicultural study carried out in the Máfil Commune, Los Ríos Region, Chile. Taking as a reference a 60-year-old oak forest with a second layer of 26-year-old Oregon pine, a model of the development of this mixed forest was elaborated, from the planting of Oregon pine to an assumed harvest of both species at 80 years of age for roble and 46 years for pine. In comparison with this simulation, a pure roble forest was analyzed, using a Density Management Diagram as a reference for its development. It is shown that the mixed forest achieves significantly higher internal rates of return (IRR) than the pure roble forest, when the conifer canopy is allowed to grow for more than 35 years. Enrichment is more efficient the lower the quality of the *Nothofagus* stand at the time of establishing the Douglas fir. The IRR of the mixed forest at the age of 80/46 years, roble and Douglas fir respectively, was 11.2%, where Douglas fir represents 7.8%. In the pure *Nothofagus* forest, the IRR culminated at 60 years old (5.1%) and dropped to 3.4% at 80 years old. In the mixed forest studied, the additive growth is unilateral, i.e., Douglas fir enhances roble, but vice versa is not the case.

Key words: *Nothofagus obliqua*, *Pseudotsuga menziesii*, mixed forests, underplanting, financial evaluation, overyielding.

INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, los bosques de una sola especie son escasos y se limitan a zonas de condiciones climáticas o edáficas muy específicas, que sólo permiten que prosperen aquellas especies arbóreas que hayan logrado un alto grado de adaptación, el cual les permite superar a los potenciales competidores. Esta predominancia de bosque mixtos en la naturaleza contrasta con la estructura de bosque plantados, que en la mayoría de los casos son monocultivos. Desde los inicios de las forestaciones artificiales, las plantaciones monoespecíficas se han justificado con argumentos económicos (Hartwig, 1994; Peters, 1938). Sin embargo, desde algunos decenios, iniciando en el viejo continente, se ha generado un cambio en el ámbito de la silvicultura, en que se ha reconocido que, además de las múltiples ventajas ecológicas, también la rentabilidad de los bosques mixtos supera a la de bosques de una o ambas especies plantadas en forma de monocultivo (Pretzsch, 2009; 2013). Este rendimiento aditivo de las mezclas por lo general se origina en buenos sitios y cuando las especies muestran diferencias en sus exigencias de luz, de manera que una de las dos puede aprovechar el espacio fustal de la otra, a pesar del ambiente de sombra o semi sombra generado por sus competidores menos tolerantes.

En Chile, la mezcla artificial de cubiertas forestales se reduce a pocos pares de especies y a un área plantada casi insignificante, si se les compara con el establecimiento de los monocultivos. Como único caso con algo de importancia se pueden nombrar las plantaciones llamadas “semi naturales” que combinan las especies *Nothofagus alpina* y/o *N. obliqua* con *Pseudotsuga menziesii*. Hay ejemplos de estas forestaciones entre las Regiones de La Araucanía y Los Lagos, siendo más frecuentes en la Región de Los Ríos (Mujica *et al.*, 2008). Con respecto a su estructura, casi todas estas plantaciones son coetáneas en sí. En estos casos, la experiencia ha mostrado que existen ciertos problemas de compatibilidad entre las dos especies, los que se han tratado de manejar con esquemas de espaciamiento que asignan más líneas a la especie de menos poder competitivo y menos líneas a la más vigorosa (Grosse & Müller Using, 2008). Esta última suele ser pino oregón, expresándose a mediano y largo plazo. Otra forma de mezcla se logra al plantar la especie de luz (*Nothofagus sp.*) con un avance temporal de alrededor de 20 años, previo al establecimiento de la especie más tolerante. Al quedar esta especie en el segundo estrato, se evita que se genere la fuerte competencia que se observa en rodales coetáneos (Müller-Using *et al.*, 2016). Este método es sin duda el más seguro desde el punto de vista de la compatibilidad entre las especies, pero el menos común y más complejo de manejar silvícolamente y de analizar en términos económicos, por lo cual no está estudiado aún con respecto a los resultados financieros. En el presente estudio se evaluó un predio en la comuna de Máfil, Región de los Ríos, en el que se ha estado realizando un enriquecimiento de latizales de roble con pino oregón partiendo en el año 1990, aumentando su superficie sucesivamente a 150 ha en total. Los aspectos silvícolas de estos bosques semi naturales se han tratado detalladamente en Müller-Using *et al.*, 2022.

Para este estudio se plantean las siguientes hipótesis:

- i) En base a los resultados de un manejo piloto de bosque mixto, compuesto por las especies roble (estrato superior) y pino oregón (estrato inferior), se puede desarrollar un modelo que permite proyectar el desarrollo en valor de las dos especies en su conjunto.
- ii) La rentabilidad de los renovales de roble, enriquecidos posteriormente con pino oregón supera la tasa de retorno arrojada por un modelo de roble puro bajo las mismas condiciones de sitio.
- iii) Para desplegar el potencial aditivo de pino oregón en la mezcla estudiada, es necesario adaptar la rotación del roble más allá de lo usual, de modo que el pino oregón alcance su madurez económica.

MATERIAL Y MÉTODO

Ubicación del Estudio

El predio agrícola-forestal “El Brasil” se sitúa en las coordenadas 39°43'02,5”S; 72°59'36,7”W en la Comuna de Máfil, Región de los Ríos. Dentro de su área forestal contiene una superficie de 150 ha de

renovales de roble, originados tras una tala rasa efectuada en los años 1955/56, sin medidas posteriores de regeneración. Así se han desarrollado estos bosques en forma natural, en gran parte por brotes de tocón y en competencia con una vigorosa vegetación de la bambusácea *Chusquea quila*. Esto ha llevado a resultados deficientes con respecto a su densidad. Esta situación ha sido enfrentada mediante un programa sucesivo de enriquecimiento de los renovales, estableciendo plantaciones con 700 plantas de pino oregón, como segundo estrato bajo los robledales en fase de latizal o fustal. Así se ha creado una masa de bosques semi naturales con roble en el estrato superior y pino oregón en el inferior.

En un trabajo previo a este estudio se analizó la convivencia de ambas especies bajo distintos niveles de luminosidad, tal como se han dado por diferentes grados de apertura que representan los estratos de las copas del roble. En este contexto, se ha escogido también el caso de la más larga convivencia de ambas especies en el predio, donde roble tenía 60 años y el pino oregón en el segundo estrato 26 años (Müller-Using *et al.*, 2022). Este rodal se tomó como rodal de referencia para realizar la modelación de los escenarios. Se muestra tanto un análisis retrospectivo al momento del establecimiento del pino oregón hace 26 años, como una proyección hacia las edades 70/36 y 80/46 años de roble/pino en este bosque mixto.

Levantamiento de Datos Dasométricos

Con el instrumental clásico de forcípula, huincha métrica y altímetro Suunto se tomaron los parámetros de DAP, altura, número de árboles y área basal (AB), en tres parcelas en el estrato de los robles. Para ello se utilizó el método de Prodan¹ de los seis árboles más cercanos (Prodan, 1965).

La edad promedio de cada rodal y el incremento en diámetro de los árboles se determinó usando 15 tarugos que se analizaron en el laboratorio del Centro Experimental Forestal del Estado de Baja Saxonía/Alemania (NWFVA por sus siglas en alemán).

Lo mismo se realizó en el estrato de pino oregón, donde además se voltearon 3 árboles para medir los incrementos anuales en altura de los tres últimos brotes (*shoot length*).

Caracterización del Rodal de Referencia

- *Parámetros Dasométricos*

Las características del rodal de referencia en base al cual se realizó la reconstrucción del desarrollo de rodal en el pasado, como también la proyección futura en dos escenarios, se encuentran en el cuadro 1 proveniente del estudio silvícola descrito en Müller-Using *et al.* (2022).

Cuadro 1. Caracterización del bosque mixto de referencia.

Parámetro	Roble	Pino oregón con cobertura	Total
Edad (años)	60	26	
Altura total (m)	33	17	
Nº de árboles	99	700	
DAP (cm)	46	22	
AB (m ² /ha)	16,5	25,4	41,9
Volumen utilizable (m ³ /ha)	202	158	360
Incremento periódico anual DAP (últimos 5 años)	5	8,3	
Incremento periódico anual Altura (últimos brotes)		59,5	

El bajo número de árboles que conforman el estrato de roble puede deberse a una deficiente densidad ya desde el origen. También es posible que, sin haber sido deficiente desde un principio, el rodal haya

¹ Las parcelas de Prodan son un tipo de parcela que incluye a los 6 árboles más cercanos a puntos de muestreo. En cada punto se mide la distancia al sexto árbol y los diámetros de éste y de los 5 árboles más próximos al punto.

experimentado una alta tasa de mortalidad como efecto de la competencia ejercida por el estrato de pino oregón hacia los árboles dominados o intermedios. Esto último parece plausible, al apreciar la alta proporción del área basal ocupada por pino oregón.

Un factor importante a destacar es que el bosque mixto todavía no muestra competencia en el estrato de las copas. Pino oregón con una altura de 17 m en promedio está lejos de alcanzar las copas de roble, que forman el estrato superior en 33 m de altura.

En figura 1 se presenta la relación altura diámetro del estrato de pino oregón. Se puede apreciar la gran gama de diámetros existentes.

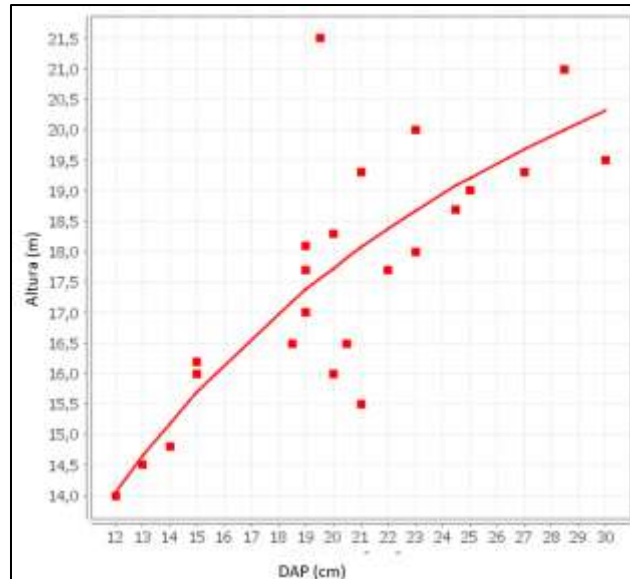


Figura 1. Curva de alturas de una muestra de 25 árboles de pino oregón en el rodal mixto de referencia.

Supuestos y Parámetros para Reconstruir y Proyectar el Componente Roble

- *Densidad*

La evaluación del rodal de referencia del bosque mixto se inició en el año en que se estableció el pino oregón debajo del latizal de roble, que entonces tenía 34 años. En este momento se tomó la decisión de efectuar una inversión en el rodal a través de su enriquecimiento. En la actualidad dicho rodal tiene 60 años. Si bien se conoce el número de árboles actual, se ignora su densidad a los 34 años. La información disponible es el relato del propietario, que indica que empezó a mezclar los robledales más deficientes primero, es decir los con muy baja densidad, y que en el predio también hay rodales con densidad normal que fueron enriquecidos. Por eso se optó por trabajar con 2 escenarios: uno parte con una densidad muy baja a la edad de 36 años (escenario 1) y el otro con una densidad normal que se asemeja a la línea de cierre de copas del Diagrama Manejo de Densidad (DMD) de INFOR (Müller-Using *et al.* 2012) para la especie roble.

Los DMD son modelos estáticos de las existencias en biomasa en los que se representa gráficamente la relación entre producción (volumen, área basal), densidad y mortalidad a través de los distintos estados de desarrollo. Son independientes de la edad y de la calidad de sitio. En caso del presente estudio, donde el factor tiempo tiene relevancia, este se incorpora a través de información adicional sobre la tasa de crecimiento medio del rodal. De esta manera, es posible proyectar la relación de tamaño-densidad del

rodal que se mantiene en la línea de cierre de copas (Línea B) del diagrama de Gingrich a distantes edades. Dentro de este diagrama y de acuerdo a la suposición de un raleo fuerte precedente, en nuestro estudio se considera una densidad al nivel de la línea B que representa la densidad inferior de la ocupación completa del sitio.

Siguiendo este supuesto, se usaron dos diferentes tasas de mortalidad entre las edades 34 y 60 años:

En el escenario 1, donde ya en el estado de desarrollo de latizal la densidad era muy baja, tendiente a individuos solitarios, se trabajó con una mortalidad de 0,5 árboles/ha-año (Bahamondez, 1992 modificado por Müller-Using *et al.*, 2020).

En el escenario 2, se supone que entre 36 y 47 años de edad, el número de árboles está representado por la línea de cierre de copa del Diagrama de Manejo de Densidad. Sin embargo, habiéndose formado un latizal bajo y denso de pino oregón en el estrato de sotobosque después del primer decenio de crecimiento, esta masa vegetal podría ejercer competencia por agua y/o nutrientes que aumentaría la mortalidad del roble por el lado de los árboles dominados y, más tarde, de los intermedios. Esto a tal punto, que con 60 años el renoval alcanzaría la densidad verdadera del referencial por debajo del 10% de densidad relativa, según el diagrama de manejo de densidad utilizado.

A partir de los 60 años la trayectoria del escenario 1 y 2 se juntan y la proyección de su futuro desarrollo es el mismo. Aquí el supuesto es de dos raleos en el pino oregón, que mantendrían la futura mortalidad en el fustal viejo del roble nuevamente a un muy bajo nivel de 0,5 árboles/ha-año.

En el mismo lapso la densidad del roble puro sigue los patrones del mencionado Diagrama de Manejo de Densidad (DMD).

- *Crecimiento*

Tratándose en todos los escenarios de robledales en sitios ricos, pero bastante ralos y correspondientes a la fase entre renovales adultos y fustales, se trabajó con el IMA (incremento medio anual) del rodal de referencia, es decir con 3,5 mm de incremento radial tanto en la reconstrucción como en la proyección.

El incremento en altura se diferenció por edad, considerando un IPA (incremento periódico anual) de 50 cm/año para los rodales de 36 a 60 años y de 30 cm/año después de ese intervalo.

- *Factor de Forma y Ahusamiento Fustal*

En trabajos previos a este estudio se ha experimentado un factor de forma de 0,474 en la zona de mejor crecimiento de los robles (Müller-Using B., *sin publicar*). Según ese factor la reducción diamétrica es de 1,5 cm por m corriente.

- *Clasificación en Productos*

Se usó trozos de 3,6 m de largo, como es usual en el comercio de madera rolliza en Chile. El diámetro límite en la punta del trozo se determinó en 32 cm s.c. Se calculó hasta 3 trozos por árbol según su DAP, ya que sobre el tercer trozo normalmente no se pueden esperar cualidades aptas para el aserrío. El resto del volumen hasta un diámetro de 7 cm se clasificó como leña.

- *Precios y Medidas Comerciales*

De acuerdo con datos de la empresa Forestal Rio Pitildeo se usó los siguientes precios para la madera de roble en pie: 4.000 \$/pulgada para los dos primeros trozos de aserrío, 2.800 \$/pulgada para el tercer trozo, y 18.000 \$/m³ para la leña. La conversión entre pulgadas y metros cúbicos es de 20,5"/m³.

- *Representatividad Valor por Árbol versus Valor por Hectárea.*

Debido a la baja competencia intraespecífica entre los ejemplares de roble, y por lo mismo, a la escasa inhibición del crecimiento de estos árboles, no se observó una diferenciación importante en el tamaño de los individuos de esta especie. En tales condiciones se puede utilizar la estimación del valor del árbol medio como representante para realizar la expansión a la hectárea.

- *Determinación de la Rentabilidad*

Basado en los parámetros presentados, es posible calcular el aumento en valor del componente roble además de la tasa de retorno de la inversión de la plantación suplementaria de pino oregón y realizar una comparación con la opción “roble puro” usando la expresión (1) (Oesten y Roeder, 2008).

$$p = 100 \cdot \left(\sqrt[n]{\frac{K_n}{K_0}} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

P = tasa de retorno entre un capital invertido al año 0 y al final del tiempo considerado
K₀ = Capital invertido al inicio (año 0);
K_n = Capital al final;
N = Número de años entre K₀ y K_n

Supuestos y Parámetros para Reconstruir y Proyectar el Crecimiento en Valor del Componente Pino Oregón

- *Establecimiento de la Plantación de Enriquecimiento (Pino Oregón).*

A la edad de 34 años se estableció bajo el robledal de referencia, plantas de pino oregón a razón de 700 pl/ha. Para ello fue necesario efectuar un desmalezado intensivo en el mismo año del establecimiento, usando una pequeña retroexcavadora a un costo de 600.000 \$/ha. Plantas y plantación se evalúan en 420.000 \$/ha. Se efectuó también una primera limpia en el año siguiente de la plantación, evaluada en 300.000 \$/ha y una segunda limpia de 300.000 \$/ha, dos años después del establecimiento. Ambas faenas fueron necesarias para controlar la alta presión ejercida por la quila.

- *Raleos*

El modelo de manejo considera un primer raleo por lo bajo a la edad de 26 años, cuando la plantación de pino oregón alcanza el estado de latizal, debajo del fustal de roble que en ese momento tiene 60 años.

Considerando que se dispone de los valores reales de diámetro y altura del rodal (Cuadro 1), los que muestran una alta variabilidad en los diámetros de pino oregón, se realizó el ejercicio de determinar árbol por árbol su permanencia o extracción, extrayendo los individuos de menor diámetro y tamaño hasta alcanzar el 30% del número de árboles. A los árboles remanentes se les atribuyó un incremento diamétrico de 0,86 cm/año hasta llegar a la edad de 36 años, edad en que se considera un segundo raleo para el caso que se extendiera la rotación de pino oregón por otros 10 años (46 años). El incremento diamétrico anual se derivó del crecimiento radial de los últimos 5 años (21 a 26 años), estimado con tarugos extraídos del mismo rodal (Müller-Using *et al.*, 2022). Para el desarrollo en altura, se trabajó con un incremento anual de 59 cm, derivado del largo de las tres últimas flechas medidas en tres árboles volteados para este fin en el mismo estudio anterior. Con eso se proyectó el rodal a 10 años y nuevamente se determinó el 30% de los árboles más pequeños para su eliminación, simulando de esta manera el segundo raleo. Este procedimiento resultó más acertado que trabajar con la proyección del árbol medio, ya que estos últimos respecto a su contenido en productos son muy influenciados por la gran cantidad de árboles pequeños presentes en el rodal (cuadro 1). De esta manera se pierden los saltos de valor que existen entre los productos de los árboles de mayores diámetros, lo que conduce a una subestimación del valor real de los árboles remanentes. En relación al área basal, el primer raleo

significó una reducción del 24% y el segundo raleo un 35%, ambos dirigidos al estrato intermedio y codominante de los respectivos rodales modelo.

- *Corta Final*

Se consideró dos edades para la cosecha final: (i) Cosecha a los 36 años, donde no se consideró el segundo raleo y se determinó el volumen de cosecha agregando 10 años de crecimiento en diámetro y altura a la masa de los árboles después del primer raleo; (ii) Cosecha a los 46 años, donde se consideró el mismo crecimiento para los árboles remanentes después del segundo raleo.

- *Productos y Precios*

Para simular el trozado de los árboles a cosechar se usó el modelo desarrollado por Basualto, alrededor del año 2000, el cual ha mostrado buen acierto en la práctica.

Los precios de la madera de pino oregón se entienden al contado y se basan en la estadística de la empresa Forestal Rio Pítildeo, que tiene una larga trayectoria de compra-venta de madera entre las regiones de la Araucanía a Los Lagos (cuadro 2):

Cuadro 2. Precios en pie para los productos de pino oregón.

Producto	Largo (m)	Precio		Diámetro (cm)
		(\$/m ³)	(\$/mr*)	
Madera aserrable	7,0	106.690		
	6,0	88.260		
	5,0	77.610		
	4,0	69.600		
	3,2	66.110		28
	3,2	62.990		26
	3,2	61.560		24
	3,2	58.690		22
	3,2	55.450		20
	3,2	50.774		18
Polines aserrable	2,5		28.000	
Polines no aserrable	2,5		6.000	

*mr: metro ruma

Para estimar los costos que genera el establecimiento de pino oregón se consideró las actividades que se detallan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Costos de las actividades de establecimiento del componente pino oregón y tasa de descuento de las tres alternativas de manejo consideradas.

Ítem	Valor CP
Control de maleza pre establecimiento	600.000
Plantación de 700 plantas	420.000
Control de maleza (año 1)	300.000
Control de maleza (año 2)	300.000
Tasa de descuento	4%

RESULTADOS

Análisis Económico del Bosque Mixto Roble-Pino Oregón y del Roble Puro

- *Desarrollo en Valor del Componente Roble*

En el escenario 1 se asume que el robleal de referencia tenía muy baja densidad al momento de enriquecerlo con pino oregón, ya sea por un proceso de instalación deficiente o por un raleo extremadamente fuerte antes de realizar la plantación. En el escenario 2 se considera que la baja densidad del roble es efecto de la competencia ejercida por el pino oregón entre las edades de 45 y 60 años.

En la Figura 2 se muestran las supuestas curvas de densidad de estos dos escenarios, desde el momento del enriquecimiento hasta la cosecha, pasando por el punto común a los 60 años, el cual corresponde al rodal medido en este estudio. Como referencia se agrega la curva de cierre de copas (curva B) del Diagrama de Manejo de Densidad de Gingrich (Müller-Using *et al.* 2012).

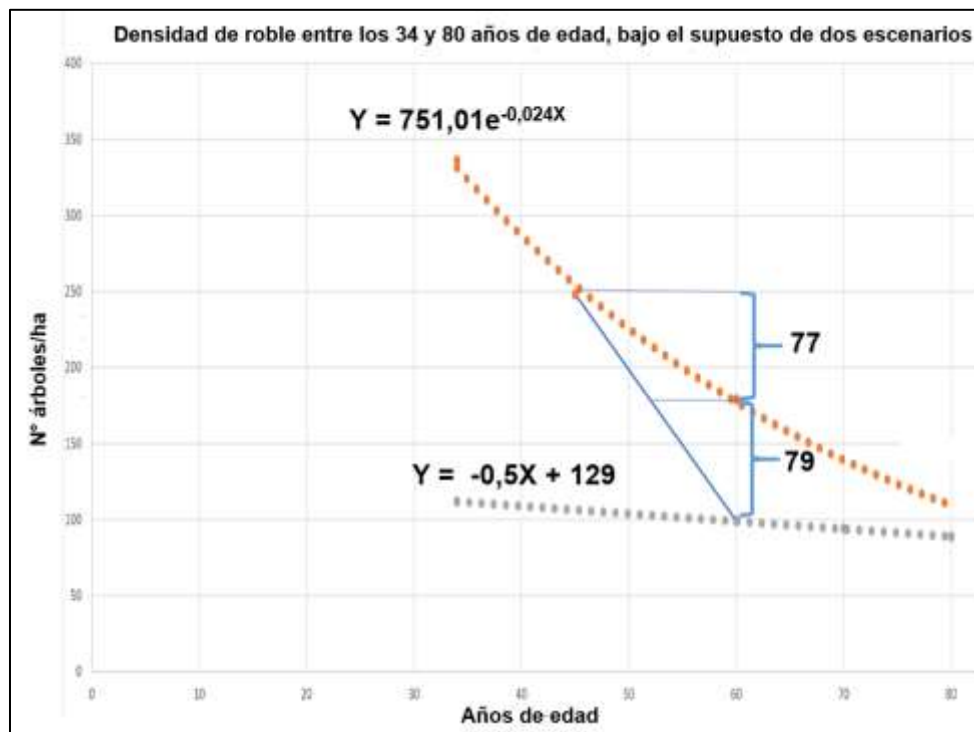


Figura 2. Evolución de la densidad de roble a partir de los 34 años. Escenario 1 representado por la línea gris. Escenario 2 representado por la línea naranja en el intervalo 35-45 años, por la línea azul en el intervalo 45-60 años y por la línea gris desde los 60 años en adelante. La curva naranja entre los 34 y 80 años corresponde a la densidad de roble puro según Diagrama de Manejo de Densidad, línea B.

De la Figura 2 se desprende que según el modelo del escenario 2 y en comparación con el modelo de roble puro, a partir de los 45 años de edad el número de árboles decae con mayor velocidad, debido al supuesto de la competencia ejercida por el estrato de pino oregón. Mientras la mortalidad en el bosque de roble puro equivale a 77 árboles, entre las edades 45 y 60, en el escenario 2 la disminución es de 156 árboles, o sea existiría una diferencia de 79 árboles en el mismo lapso de tiempo. Al llegar el rodal a 60 años, el número de árboles no sigue disminuyendo, ya que en ese momento la competencia disminuye como consecuencia de los dos raleos consecutivos a realizarse en el estrato de pino oregón,

específicamente a las edades de 26 y 36 años. En el Cuadro 4 se presentan en forma numérica las distintas densidades de los modelos.

Cuadro 4. Densidad de roble en número de árboles por hectárea, a distintas edades, en dos escenarios de bosque mixto y uno de bosque puro, según Diagrama de Manejo de Densidad.

Escenario	Edad de roble en años				
	34	45	60	70	80
Bosque mixto 1	112	106	99	94	89
Bosque mixto 2	336	255	99	94	89
Roble puro	336	255	178	140	110

El volumen estimado a partir del árbol medio del rodal de referencia (roble, 60 años) se presenta en el Cuadro 5. Se complementa esta información con la proporción de productos esperados y el valor del producto en m³ y por hectárea. En Cuadro 6 se encuentran los valores esperados en un rodal que sigue la línea de cierre de copa del Diagrama de Densidad de Gingrich para roble (Müller-Using *et al.*, 2012).

Cuadro 5. Volumen de los árboles medio de roble que representan las diferentes edades en el estudio, su desglose en productos y su transformación en valores por hectárea.

Edad (Años)	Escenario	Volúmenes		Valor por árbol (\$)	Densidad (N° arb)	Valor por hectárea (\$)
		Árbol (m ³ cc)	Productos (m ³)			
34	1	0,60	0,60 leña	18.000	112	2.016.000
34	2	0,55	0,55 leña	16.500	336	5.544.000
45	1	1,11	0,80 leña 0,31 trozos	38.606	106	4.092.236
45	2	1,08	0,76 leña 0,30 trozos	38.200	255	9.741.000
60	único	2,21	1,00 leña 1,21 trozos	113.262	99	11.212.938
70	único	3,19	1,64 leña 1,55 trozos	160.000	94	25.040.000
80	único	4,29	1,90 leña 2,39 trozos	234.940	89	20.909.660

Cuadro 6. Volumen de los árboles medio de roble en un rodal tipo que sigue la línea de cierre de copa (línea B) del Diagrama de Densidad de Gingrich.

Edad (Años)	Volúmenes		Valor por árbol (\$)	Densidad (N° arb)	Valor por hectárea (\$)
	árbol (m ³ cc)	Productos (m ³)			
34	0,55	100% leña	16.500	336	5.544.000
60	2,21	1,00 leña 1,21 trozos	113.262	178	20.160.636
70	3,19	1,64 leña 1,55 trozos	160.000	140	22.400.000
80	4,29	1,90 leña 2,39 trozos	234.940	110	25.843.400

En el caso específico del rodal de referencia (Parcela 3, Fundo El Brasil), el modelo del escenario 1 determina 112 árboles/ha de roble a la edad de 34 años, lo que equivale a un valor en pie de

\$2.016.000/ha; a los 60 años la densidad decrece a 99 árboles/ha, con un valor en pie de \$11.213.000/ha.

El modelo del escenario 2 cuenta con 336 árboles de roble a la edad de 34 años, lo que equivale a un valor en pie de \$5.544.000/ha. Esta densidad disminuye a 99 árboles/ha hasta la edad de 60 años, equivalente a un valor en pie de los robles de \$11.213.000/ha.

El ficticio robleal puro, siguiendo la línea B del Diagrama de Densidad, representa un valor en pie de \$5.544.000 a la edad de 34 años, incrementándose a \$ 20.160.636 al alcanzar la edad de 60 años.

- *Desarrollo en Valor del Componente Pino Oregón*

El Cuadro 7 presenta los volúmenes, valores promedio según el desglose en productos y los ingresos por hectárea que genera el componente pino oregón en tres alternativas de manejo:

- Alternativa 1: Cosecha a la edad de 60/26 años (roble/pino)
- Alternativa 2: Raleo de pino oregón a la edad 26 años y cosecha a los 70/36 años (roble/pino)
- Alternativa 3. Raleos de pino oregón a las edades de 26 y 36 años, y cosecha a los 80/46 años (roble/pino).

Cuadro 7. Volúmenes cosechables, valor promedio por metro cúbico extraído y valor en pie por hectárea del estrato de pino oregón.

Alternativa de manejo	Ítem	Edad (años)	Densidad residual (N° arb)	Volumen Residual (m³)	Volumen de Corta (m³)	Valor	
						(\$/m³)	(\$/ha)
Alternativa 1	Cosecha	26	0	0	112	39.243	4.395.261
Alternativa 2	Raleo	26	486	90	22	21.771	471.999
	Cosecha	36	0	0	277	64.221	17.816.696
Alternativa 3	Raleo	26	486	90	22	21.771	471.999
	Raleo	36	334	195	83	63.048	5.215.326
	Cosecha	46	0	0	429	84.119	36.103.366

En base a los costos y beneficios se realiza un cálculo de rentabilidad de la inversión, al inicio y los 2 siguientes años después del establecimiento (controles de maleza). Los resultados de este análisis, separados por alternativa de manejo, se entregan en el Cuadro 8.

- *Desarrollo en Valor del Rodal Mixto en Dos Escenarios en Comparación con el Modelo Roble Puro.*

En el cuadro 9 se muestran los valores para el bosque mixto en sus dos escenarios, partiendo a las edades de 34/0 años (roble/pino), pasando por 60/26, 70/36 y 80/46 años (roble/pino). Los valores de este cuadro se consiguen al combinar las cifras del Cuadro 3 (roble) con los de Cuadro 8 (pino oregón). Se presentan también los valores correspondientes al modelo roble puro, a las edades de 34, 60, 70 y 80 años.

Se puede apreciar que el bosque mixto del escenario 1 empieza con un valor muy bajo, ya que, al valor del rodal de roble es bajo por el reducido número de árboles que caracteriza a este escenario, y además se le resta el costo de la plantación suplementaria de pino oregón. El bosque mixto del escenario 2 inicialmente funciona con el mismo número de árboles que el rodal puro de roble, pero se le descuenta el costo de la plantación suplementaria de pino oregón.

El Cuadro 10 muestra como los valores de este cuadro se traducen en las respectivas tasas de retorno (TIR).

Cuadro 8. Valores por hectárea de tres alternativas de manejo del componente pino oregón en un bosque mixto de *Nothofagus obliqua* y *Pseudotsuga menziesii*.

Alternativa de manejo	Ítem	Año de Ejecución	Monto (\$)	Actualización (años)	Tasa de descuento (%)	Monto actualizado (\$)	TIR (%)
Alternativa 1	Establecimiento	0	-1.020.000	26	4	-2.827.440	
	Control maleza (1)	1	-300.000	25	4	-799.800	
	Control maleza (2)	2	-300.000	24	4	-768.900	
	Ingreso por cosecha	26				4.395.261	
	Flujo neto					-879	
Alternativa 2	Establecimiento	0	-1.020.000	36	4	-4.186.011	7,2
	Control maleza (1)	1	-300.000	35	4	-1.183.000	
	Control maleza (2)	2	-300.000	34	4	-1.138.295	
	Ingreso por raleo (1)	26	471.999	10	4	698.674	
	Ingreso por cosecha	36	17.816.696	-		17.816.696	
Flujo neto					12.007.237		
Alternativa 3	Establecimiento	0	-1.020.000	46	4	-6.196.319	7,8
	Control maleza (1)	1	-300.000	45	4	-1.752.353	
	Control maleza (2)	2	-300.000	44	4	-1.684.955	
	Ingreso por raleo (1)	26	471.999	20	4	1.034.208	
	Ingreso por raleo (2)	36	5.215.326	10	4	7.719.956	
	Ingreso por cosecha	46	36.103.366	-		36.103.366	
Flujo neto					35.223.904		

Cuadro 9. Valores redondeados en pesos chileno para el bosque puro de roble y para dos escenarios de bosque mixto roble-pino oregón.

Bosque	Escenario	Edad Roble/Edad Pino (años)			
		34/0	60/26	70/36	80/46
Mixto (roble y pino oregón)	1	430.000	10.604.000	27.047.000	56.132.000
	2	3.958.000	10.604.000	27.047.000	56.132.000
Puro (Roble)	-	5.544.000	20.161.000	22.400.000	25.843.000

Cuadro 10. Tasas internas de retorno (TIR) de los dos escenarios, calculadas para las edades 60/26; 70/36 y 80/46 roble/pino oregón, respectivamente y roble puro.

Escenarios	C ₀	C _F	Años de Producción Roble/Pino	TIR (%)
Bosque mixto (Escenario 1)	430.000	10.604.000	60/26	13,1
	430.000	27.047.000	70/36	12,2
	430.000	56.132.000	80/46	11,2
Bosque mixto (Escenario 2)	3.958.000	10.604.000	60/26	3,9
	3.958.000	27.047.000	70/36	5,5
	3.958.000	56.132.000	80/46	5,9
Roble Puro	5.544.000	20.161.000	60	5,1
	5.544.000	22.400.000	70	4
	5.544.000	25.843.000	80	3,4

C₀ = Capital al inicio del tiempo observado; C_F = Capital al final del tiempo observado

Los mayores valores de la TIR se alcanzan al enriquecer latizales que tienen una baja densidad inicial (escenario 1). En el escenario 2 la TIR más alta se alcanza dejando crecer el bosque mixto hasta la edad de 80/46 años (roble/pino), donde logra un 5,9%, mientras que, en el rodal de roble puro a la misma edad de 80 años, llega solamente a 3,4%. El roble puro alcanza su mayor TIR en una rotación de 60 años (DAP 46 cm), lo que coincide con el estudio económico sobre la definición del diámetro meta en renovales de Roble desarrollado por Müller-Using *et al.* (2021). A esta edad un bosque de roble de densidad satisfactoria y con estrato inferior de pino oregón muy joven (caso del escenario 2; roble 60

años / pino oregón 25 años) aún no alcanza desplegar su superioridad versus un robleal puro, debido a que la conífera tiene apenas dimensiones de latizal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desarrollo Económico de los Dos Componentes Roble y Pino Oregón en el Bosque Mixto

En Chile no existen estudios que documenten la convivencia de roble y pino oregón, partiendo en condiciones iguales de densidad y tratados con la misma técnica silvícola hasta la corta final, a una edad económicamente razonable. Sin embargo, la situación encontrada en el área de estudio permitió analizar un rodal y tomarlo de referencia para modelar el desarrollo, tanto 26 años hacia atrás, como 20 años hacia adelante. Como no se podía reconstruir con certeza el estado inicial del rodal al momento de establecer la mezcla, a la edad de 34 años, se recurrió a dos escenarios alternativos. El más probable es que el rodal en ese momento ya se encontrara ralo, parecido a la densidad actual, de solo 99 árboles/ha. Este supuesto se deduce del relato del propietario, quien hace 26 años inició su programa de enriquecimiento con los rodales de roble más deficientes. Por el otro lado se encontraron algunos casos en el predio donde se había aplicado el mismo programa silvícola en rodales con densidades mucho más altas y donde se espera una fuerte competencia intra e interespecífica. Esta situación se considera en el escenario 2. Aquí el supuesto es que el roble comienza a disminuir su densidad debido a la competencia a la edad de 45 años, abandonando la dinámica descrita por el diagrama de densidad para bosques puros de roble. Este segundo escenario se considera menos probable y posee un mayor grado de arbitrariedad. Sin embargo, con los dos escenarios se enmarcan las distintas posibilidades extremas de desarrollo en densidad del rodal. Se estimó necesario incluir el supuesto de una creciente competencia entre las dos especies y que merme el efecto aditivo, como está documentado en varios casos de bosques mixtos con pares de especies de crecimiento distinto (Pretzsch & Schütze, 2009). Estos autores analizaron 37 ensayos europeos con mezclas de picea (*Picea abies*) y haya (*Fagus sylvatica*), encontrando que en un 67% de los casos la mezcla llevó a una productividad superior a por lo menos una de las especies en estado puro, y que en un 57% fue superior a la productividad de ambas especies involucradas en rodales puros, fenómeno llamado “*transgressive over yielding*”.

En Chile también se han publicado estudios sobre la productividad de bosques mixtos de especies nativas, por ejemplo, compuestos por un estrato superior de especies del género *Nothofagus* y diversas especies siempre verdes de alta tolerancia a la sombra (Lusk & Ortega, 2003). En el estudio mencionado se encontró un mayor nivel productivo en estos bosques mixtos de dos estratos que en bosques monoestratificados. La diferencia fue más evidente mientras más denso fuera el estrato de las especies siempre verdes del estrato inferior. Adicionalmente, no se encontró que el estrato superior hubiera sufrido de la competencia del estrato inferior. Más diferenciados fueron los resultados de un estudio de Donoso & Lusk (2007) en el bosque de montaña del tipo Coigüe-Raulí-Tepa. Aquí sí se observó una disminución de crecimiento en la especie mañío (*Saxegothaea conspicua*) en el estrato inferior, al aumentar la densidad de las copas de coigüe (*Nothofagus dombeyi*) en el estrato dominante. Además, tepa (*Laureliopsis philippiana*), especie acompañante en el estrato inferior, no evidenció merma en su crecimiento, independientemente de la densidad del estrato superior de los coigües. De ello los autores concluyen que mientras más diferente sea la tolerancia a la sombra de las especies de un bosque mixto, mayor es el crecimiento aditivo de su conjunto.

En bosques mixtos de roble y pino oregón se combinan especies muy distintas en su crecimiento, pero no tanto en su tolerancia a la sombra. Roble, considerado como intolerante, apenas alcanza un incremento medio anual de 12 m³/ha año a una edad de rotación de 60 años (Donoso *et al.* 1993), mientras que pino oregón, considerado como semitolerante, en el mismo periodo llega a 28 m³/ha año (Büchner *et al.*, 2019). Estas condiciones llevan a que la aditividad de la mezcla sea unilateral, es decir que favorece al roble en relación a su estado puro y, por el contrario, reduce el nivel de productividad del pino oregón respecto también de su estado puro. La misma situación ha sido observada para mezclas de raulí (*Nothofagus alpina*) con pino oregón. En Europa existen experiencias semejantes para la mezcla de *Pinus sylvestris* (crecimiento lento, intolerante a la sombra) y *Pseudotsuga menziesii* (crecimiento rápido,

semitolerante a la sombra) (Baade & Guericke, 2000) o *Betula pendula* (intolerante) y *Picea excelsa* (semitolerante) (Valkonen y Valsta, 2001).

En el presente trabajo se encontró un alto efecto financiero generado por el enriquecimiento con pino oregón de renovales de roble de calidad deficiente. La ventaja observada excede a las publicadas en la literatura sobre bosque mixtos en Europa (Pretzsch & Schütze 2009). Esto se debe en parte a los factores edáficos y climáticos, que hacen que el centro-sur de Chile supere las condiciones de crecimiento para bosques templados encontradas en Europa central. Obedece también al uso de una especie introducida, como el pino oregón, que es de rápido crecimiento y con características semitolerantes.

La primera hipótesis de este trabajo, referida a la posibilidad de desarrollar, a partir de datos empíricos, un modelo que permita proyectar el desarrollo en valor de un bosque mixto de roble y pino oregón, sólo se cumple parcialmente. Faltaron datos para el rodal de roble a la edad de establecimiento del pino oregón, por lo cual se tuvo que asumir escenarios de trabajo. De esta manera, se entrega un rango que se espera incluya a la rentabilidad real, y se deja en evidencia que el éxito económico de la mezcla estudiada depende fuertemente del grado de degradación del rodal inicial.

Se muestra que la rentabilidad de la mezcla roble/pino oregón supera la de un bosque puro de roble (hipótesis dos), puesto que incluso en el caso de un bosque sin degradación, la rentabilidad de su enriquecimiento lleva a una tasa de retorno superior (5,9%) a la calculada para el bosque puro (3,4%), para la misma edad de cosecha.

Sin embargo, se plantea en la hipótesis tres que, al establecer la mezcla a una edad del roble mayor a 34 años, se debe alargar la rotación para permitir que pino oregón alcance diámetros comerciales. Los resultados del estudio muestran que esto solo es válido en caso de robledales no degradados, donde la competencia entre las especies es fuerte, y donde la mezcla muestra su máxima TIR a la avanzada edad de 80 años. En este caso, con una rotación de 60 años, la TIR baja a 3,9% debido a la falta de desarrollo del pino oregón. De esta manera la rentabilidad es menor que la de un rodal puro de roble en estado intacto.

Distinta es la situación en bosques degradados de roble. Ahí las TIR de la mezcla muestran una alta superioridad al compararlas con las del bosque puro. Como consecuencia, se recomienda el enriquecimiento con pino oregón solo para robledales degradados (de muy baja densidad). Si se quisiera realizar en robledales intactos, sería recomendable ejecutar el establecimiento de la conífera temprano, antes de la edad de 34 años, a objeto de que pino oregón alcance dimensiones comerciales a los 60 años de la edad del roble, lo que es el óptimo en términos de rentabilidad.

En el bosque mixto, si bien el efecto es unilateral en términos del crecimiento aditivo, favoreciendo a roble, el pino oregón también recibe un efecto positivo, en este caso sobre la calidad de su madera (Müller-Using *et al.*, 2022). Existen además otras ventajas del bosque mixto Grosse & Müller-Using (2008), las que aplicadas al presente estudio serían la supresión de la maleza (*Chusquea quila*) y la protección de los fustes del roble contra ataques de insectos, como el perforador de la madera y causante de las gusaneras en roble, *Holopterus chilensis* (Coleoptera; cerambycidae).

Sobre la disminución de riesgos financieros que pueden brindar mezclas de especies forestales en comparación con monocultivos existe una amplia literatura internacional, como fue resumida por Knoke & Hahn (2007).

REFERENCIAS

- Baade, U. & Guericke, M. (2000). Auswertung einer Douglasien-Wuchsreihe im Wuchsgebiet Geest Mitte. Tagungsband des Nordwestdeutschen Forstvereins 2000 in Kirchatten. Alemania.
- Bahamondez, C. (1992). Investigación sobre un modelo de simulación para renovales de roble-raulí. Proceedings IUFRO, Congreso Valdivia.

- Büchner, C., Martín, M., Sagardía, R., Rojas, Y., Bahamondez, C. Guzman, F., Barrientos, M. *et al.* (2019). Disponibilidad de madera en plantaciones de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Regiones Araucanía, Los Ríos, Los Lagos 2019 – 2049. Instituto Forestal. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30351>
- Donoso, P., Monfil, T. Otero, L & Barrales, L. (1993). Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las Provincias de Cautín y Valdivia. Ciencia & Investigación Forestal, 7(2): 253-287. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.188>
- Donoso, P.J., & Lusk, C.H. (2007). Differential effects of emergent *Nothofagus dombeyi* on growth and basal area of canopy species in an old-growth temperate rainforest. Journal of Vegetation Science, 18(5): 675-684. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02581.x>
- Grosse, H. & Müller-Using, B. (2008). Mezclas coetáneas de especies del género *Nothofagus* y pino oregón. En: Bosques seminaturales, una opción para la rehabilitación de bosques degradados. INFOR/Gobierno de Chile/Innova. Valdivia. Pp: 67-88.
- Hartwig, F. (1994). La tierra que recuperamos. Editorial Los Andes. Santiago. 256 p.
- Knoke, Th. & Hahn, A. (2007). Baumartenvielfalt und Produktionsrisiken: ein Forschungseinblick und –ausblick. Schweiz Z Forstwes, N°158. Pp: 312-322. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0312>
- Lusk, C.H., & Ortega, A. (2003). Vertical structure and basal area development in second-growth *Nothofagus* stands in Chile. Journal of Applied Ecology, 40(4): 639-645. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00827.x>
- Müller-Using, B., Petersen, R. & Müller-Using, S. (2022). Evaluación silvícola de bosques seminaturales de Roble y Pino Oregón: Estudio de caso en una empresa agrícola-forestal de mediana propiedad en el Centro-Sur de Chile. Ciencia & Investigación Forestal, 28(2): 33–45. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.563>
- Müller-Using, B., Uhde, B., Varas, A., Cabrera, J., Cuevas, W. & González, D. (2016). The mixture of *Nothofagus* species with *Pseudotsuga menziesii* in South Central Chile. Forstarchiv, 87(6): 175-181.
- Müller-Using, B. Tiemann, M., Donoso P. & Wolf, B. (2020). Crecimiento, desarrollo cualitativo y retorno financiero de una forestación con Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst) al pie de monte andino del Centro Sur de Chile. Ciencias & Investigación Forestal, 26(1): 67-82. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.527>
- Müller-Using, S., Martín M. & Merino, R. (2012). El diagrama de densidad de Gingrich como herramienta para la planificación de raleos en renovales del tipo roble-raulí-coigüe. INFOR. Documento de Divulgación N° 39. Santiago. 15 p.
- Müller-Using, S., Rojas Ponce, Y. & Martín Stüven, M. (2021). Una propuesta para la definición de un diámetro meta para los renovales de roble (*Nothofagus obliqua*). Ciencia & Investigación Forestal, 27(3): 49-61. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.553>
- Mujica, R., Grosse, H. & Müller-Using, B. (Eds). (2008). Bosques seminaturales, una opción para la rehabilitación de bosques degradados. INFOR, Gobierno de Chile, Innova/Corfo, ISBN 978-956-318-012-01. Valdivia, 165 p.
- Oesten, G. & Roeder, A. (2008). Management von Forstbetrieben. Band 1 Grundlagen, Betriebspolitik. 408 p.
- Peters, K. (1938). Estudio Experimental sobre Selvicultura en Chile. Imprenta Nacimiento. Santiago. Chile.
- Pretzsch, H., Bielak, K., Block, J., Bruchwald, A., Dieler, J., Ehrhart, HP., Kohnle, U. *et al.* (2013). Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. European Journal of Forest Research, N° 132. Pp : 263–280. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0673-y>
- Pretzsch, H. & Schütze, G. (2009). Transgressive overyielding in mixed compared to pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation on individual tree level. European Journal of Forest Research, N° 128. Pp: 183-204. <https://doi.org/10.1007/s10342-008-0215-9>
- Prodan, M. (1965). Holzmesslehre. Editorial Sauerländer's. Frankfurt. 323 pp.
- Valkonen, S., & Valsta, L. (2001). Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models. Forest Ecology and Management, 140(2-3): 133-149. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00321-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00321-2)