

Desarrollo de una guía de manejo de la densidad en bosques de segundo crecimiento de roble (*Nothofagus obliqua*) en la región del Biobío

Stand density management diagrams for roble (*Nothofagus obliqua*) in the Biobío Region, Chile

Burkhard Müller-Using ^{a*}, Rolando Rodríguez ^b, Pablo Gajardo ^b

*Autor de correspondencia: ^a Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, casilla 160-C, Concepción, Chile, burkhardmusing@yahoo.de

^b Corporación Nacional Forestal - CONAF, Barros Arana 215, 2° piso, Concepción, Chile.

SUMMARY

This study developed a stand density management diagrams using an allometric size-density relationship, based only permanent plots from the Biobío region and to provide a regional tool to allow a better quantitative control of the intermediate cut in roble (*Nothofagus obliqua*). We used 20 fragments of pure roble located at different environments in the region of Biobío. To get mortality initiation line and the maximum stand production initiation line, were used theoretical estimates of relative density of 0.60 and 0.40 respectively in relation to the maximum size-density line. In our study, the slope of size-density relationships and maximum size-density line differs significantly from the value determined by other studies developed for roble in the country. Furthermore, the slope of size-density relationships was more negative in the Biobío region for roble, and is indicative of lower growth rates and lower site productivity. It justifies develop models of stand density management diagrams considering specific ecological zones for the same species; furthermore it is necessary to standardize methodologically these studies.

Key words: allometry, size-density relationship, roble, thinning, *Nothofagus*.

RESUMEN

Se desarrolló un diagrama de densidad utilizando la relación alométrica tamaño-densidad, basado en parcelas temporales provenientes de la región del Biobío y que permite aportar una herramienta de índole regional para la planificación y control de las cortas intermedias en renovales de roble (*Nothofagus obliqua*). Para ello, se establecieron 20 unidades muestrales en fragmentos de renovales puros de roble, localizados en distintos ambientes de la región del Biobío. Para la obtención de la línea de inicio de la mortalidad y de máxima producción del rodal, se utilizaron estimaciones teóricas de densidad relativa de 0,60 y 0,40 respectivamente en relación a la línea de más alta densidad. Este estudio, presentó diferencias significativas en la pendiente de la relación alométrica tamaño-densidad y la línea de más alta densidad con respecto a otros trabajos desarrollados para roble en el país. Además, la mayor pendiente negativa, indica menores tasas de crecimiento de roble, debido a calidades de sitio inferiores. Por ello, se justifica desarrollar modelos de diagramas de densidad considerando zonas ecológicas específicas para una misma especie, además es necesario homogenizar metodológicamente estos estudios. Se sugiere, bajo la premisa de no intervenir bajo el límite del 0,4 de la línea máxima densidad, que no parece admisible efectuar más de dos raleos dentro del período de una década.

Palabras clave: alometría, relación tamaño-densidad, roble, raleo, *Nothofagus*.

INTRODUCCIÓN

Chile posee 13.599.610 ha de bosques nativos, de las cuales el tipo forestal roble-raulí-coigüe comprende 1.468.476 ha. A su vez, la región del Biobío posee 768.553 ha de bosques nativos de las cuales 480.840 ha pertenecen a este tipo forestal (CONAF 2011). Dada la magnitud de su superficie, las perspectivas de recuperación del bosque, las posibilidades de manejo y su potencial económico, lo convierten en uno de los más relevantes en Chile y en la región del Biobío. Considerando estos aspectos y los distintos estados de desarrollo que presenta, el raleo de renovales es la práctica silvícola más utilizada por los propietarios de bosques nativos.

El manejo de la densidad del rodal, constituye una de las herramientas más efectivas para que los silvicultores puedan alcanzar un amplio rango de objetivos de manejo, puesto que mejoran los atributos del rodal, al estar altamente influenciados por la densidad (Famden 1996). En efecto, la densidad es una variable del rodal que permite predecir algunos de estos atributos como la forma de los árboles, su tasa de crecimiento y mortalidad, constituyendo el mejor indicador de la integridad ecológica de un bosque o rodal. Además, el raleo al regular la densidad del rodal, permite minimizar la competencia (Dean y Baldwin 1993) y concentrar el crecimiento en árboles seleccionados para la producción de madera, asegurar la estabilidad del rodal e incrementar la productividad del rodal o del bosque; objetivos que comparten la mayoría de los silvicultores.

El diseño de las intervenciones silvícolas y particularmente del raleo, requiere conocer la dinámica del crecimiento de las especies y su tolerancia a la sombra, características que inciden en el comportamiento competitivo. Ello es necesario conocerlo porque: i) altas densidades reducen el crecimiento de los árboles individuales, en tanto que a muy bajas densidades el rodal sub-utiliza los recursos del sitio, ii) la competencia afecta la distribución de los recursos del sitio, entre árboles individuales de la misma especie o entre especies, por lo cual, conociendo sus exigencias y la disponibilidad de los recursos del sitio para las distintas especies, se puede ajustar la densidad del rodal para equilibrar mejor la demanda y oferta de los recursos del sitio, optimizando la productividad y, iii) la productividad no sólo depende de la cantidad de volumen producido para un tiempo dado, sino también, de la conformación de los productos y el valor que les da el mercado. De esta forma, procurar el desarrollo de menos árboles, pero de calidades y dimensiones aptas para elaboraciones más nobles, conduce a una mayor productividad que un manejo con más árboles de calidades inferiores.

El crecimiento de un rodal en particular, se explica por los factores luz, agua y nutrientes. En efecto, para su desarrollo, cada árbol utiliza estos recursos hasta que el crecimiento puede ser limitado de acuerdo a la ley de Liebig o ley del mínimo y la ley de compensación, que determinan el espacio de crecimiento. Si el espacio de crecimiento no es ocupado por ninguna otra planta, éste puede quedar disponible completamente para una planta en particular, lo cual ocurre en las primeras etapas de desarrollo de un rodal, como es la situación posterior a un disturbio o plantación. Cuando las plantas han completado el espacio de crecimiento disponible, comienza la competencia con otras plantas, variando las formas en que cada especie sobrevive mediante ventajas competitivas y tratando de desarrollarse a expensas de otras plantas. En esta etapa de competencia plena del desarrollo del rodal, se iniciará el auto-raleo, en que el número de plantas (N) por unidad de superficie se reducirá, aproximadamente de acuerdo a la ley de Reineke (1933) o de Yoda *et al.* (1963).

Al respecto, Pretzsch y Bieber (2005) reportan que Reineke (1933) en su intento por encontrar una adecuada expresión de la densidad del rodal, independientemente de la calidad del sitio y edad, en base a datos recopilados en el noreste de Estados Unidos, desarrolló, para varias especies una expresión alométrica, que se basa en la relación entre el diámetro cuadrático medio (dg) y la densidad (número de árboles por unidad de área), para rodales coetáneos y a plena densidad, en que la línea de autorraleo queda definida como:

$$\ln(N) = a - 1,605 * \ln(dg) \quad [1]$$

Donde:

$\ln(N)$ = densidad del rodal (árboles ha⁻¹)

a = intercepto de la regresión

$\ln(dg)$ = diámetro cuadrático medio (cm) expresado como logaritmo natural

Por otra parte, Kira *et al.* (1953) y Yoda *et al.* (1963), investigadores japoneses que no conocieron la ley formulada por Reineke (1933), en su investigación encontraron la línea límite de autorraleo, en la siguiente expresión:

$$\ln(m) = b - 3/2 * \ln(N) \quad [2]$$

Donde:

$\ln(m)$ = peso promedio de la planta (kg)

$\ln(N)$ = densidad del rodal (árboles ha⁻¹)

En efecto, de acuerdo con un estudio en plantas herbáceas formularon la ley de autorraleo, que describe la relación entre el peso promedio (m) de una planta y la densidad (N) en plantas herbáceas coetáneas creciendo bajo condiciones naturales (Pretzsch 2002). Sin embargo, de acuerdo con Pretzsch (2002), es posible hacer una transición desde la ley de Yoda *et al.* (1957 y 1963) a la ley de densidad de Reineke, si la masa m en la forma que la presenta Kira *et al.* (1953) y Yoda *et al.* (1963), es sustituida por el diámetro cuadrático medio dg .

En esta relación alométrica existe una línea superior de autorraleo o línea límite que marca el máximo posible de la densidad de una especie de tamaño o peso determinado en masas puras coetáneas. La ley de Reineke ha adquirido una importancia considerable para la cuantificación y control de la densidad de la masa y la modelación del desarrollo del rodal en estado puro (Pretzsch 2002) y mixto (Puettmann *et al.* 1992). A su vez, Reineke (1933) utilizó el coeficiente alométrico $b = -1,605$ para desarrollar su índice de densidad de rodal (IDR), que describe la densidad de los rodales con las variables de rodal dg y N . Calculando el número de árboles en rodales relacionados con el diámetro medio de 25 cm (10 pulgadas), el IDR queda definido de acuerdo con Pretzsch y Biber (2005) como:

$$IDR = N (25/dg)^{-1,605} \quad [3]$$

La aplicación de la ley de Reineke (1933) o de Yoda *et al.* (1963) ha permitido la construcción de diagramas de manejo de la densidad de rodales, que se constituye en uno de los métodos más eficientes de planificación y manejo silvicultural de la densidad del rodal en bosques coetáneos. Estos diagramas fueron introducidos por investigadores japoneses y norteamericanos (Ando 1968, Drew y Flewelling 1977) y han tenido una amplia repercusión en el desarrollo e implementación de esquemas silvícolas para diversas especies, calidades de sitio y objetivos de manejo (Dean y Baldwin 1993).

En Chile, para la especie roble (*Nothofagus obliqua* Mirb.), tal como se presenta en bosques secundarios en estados tempranos de su desarrollo sucesional, se han propuesto diagramas de densidad definidas por su respectiva línea de más alta densidad como, por ejemplo, Gezan *et al.* (2007). Estos autores, se basan en el amplio material que tienen su centro de origen en las regiones de La Araucanía,

Los Ríos y Los Lagos, con el cual se elaboró un modelo de crecimiento para renovales de roble con y sin participación de la especie raulí (*Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil); sin embargo, para estos diagramas se ha extrapolado su uso a las regiones centro-sur (regiones del Maule y Biobío), por lo cual, en la práctica no han sido utilizados, debido a que las exigencias respecto a la densidad que permite un raleo, son demasiado altas en estas regiones en que se acentúa el clima mediterráneo.

Mediante estos diagramas se pueden definir la oportunidad e intensidad de intervenciones de raleo. Sin embargo, aplicándolos a diversos rodales de la región del Biobío, se mostraron insatisfactorios en la mayoría de los casos, ya que, insinuaron no ralear en casos en que el cierre de copas indicaban la necesidad de ampliar el espacio de crecimiento y de esta forma incentivar el desarrollo diamétrico de los árboles, que estaba obviamente retardado. De esta forma, surgió la sospecha que los diagramas usados reflejaban mejor las condiciones de sitio de la región sur de la distribución natural de roble, que la región centro-sur.

En el presente trabajo, se postula que la región del Biobío tiene condiciones de sitios diferentes a las regiones del sur, influenciando la relación alométrica tamaño-densidad, por lo cual, los diagramas de densidad debieran mostrar diferencias que afectan los esquemas de raleo, de acuerdo a lo señalado por Pretzsch (2002), que entre otros autores pone en duda la independencia la relación tamaño-densidad del sitio.

Los actuales métodos de control de la densidad, para el manejo de renovales de *Nothofagus spp.*, no consideraron las particularidades ambientales y de suelos que se presentan dentro del área de distribución de estas especies. De esta forma, se prescriben densidades mínimas a partir de las cuales, se permiten intervenciones de raleo. Al igual que en el caso de diagramas de densidad, existen indicios que estas normas no concuerdan con los niveles densidad mínima en terreno en la zona centro-sur (Nawrath 2001).

Ambas situaciones, condujeron a los autores de este trabajo, a desarrollar un diagrama de densidad basado en material proveniente exclusivamente de la región del Biobío, que permita aportar una herramienta de índole más regional para un mejor control cuantitativo de las cortas intermedias en renovales de roble.

MÉTODOS

Área de estudio. La región del Biobío cuenta con 36.929 km² y se extiende desde los 36° 00' hasta los 38° 30' S y desde los 71° 00' O hasta el Océano Pacífico. Desde el punto de vista climático, la región marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del río Biobío. Las precipitaciones fluctúan entre los 1.200 y 2.000 mm al año. La Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa hacia el oeste definen cuatro áreas agro-climáticas distribuidas longitudinalmen-

te: el sector del secano costero, el sector seco interior, la Depresión Intermedia y las estribaciones andinas. La Cordillera de la Costa al sur del río Biobío, presenta un aspecto de bloque macizo y elevado y se denomina cordillera de Nahuelbuta. La variedad de climas y los suelos de cada una de estas zonas agroclimáticas determinan los posibles usos de la tierra y su capacidad productiva.

Colección de los datos. Para desarrollar la toma de muestras se localizaron 20 fragmentos de bosques de roble, entre latizales y fustales, distribuidos sobre la región del Biobío, que representarían: i) la apariencia de una completa ocupación del sitio, ii) un estado no alterado por intervención antrópica y, iii) la presencia de árboles muertos para verificar la condición de autorraleo. La localización de los fragmentos se distribuyeron en diferentes condiciones ecológicas: Cordillera de la Costa, Cordillera de Nahuelbuta, Depresión Intermedia y precordillera andina. El estado no alterado de los fragmentos seleccionados se comprobó en terreno mediante la ausencia de tocones u otros rasgos de extracciones anteriores y mediante entrevistas con personal forestal que conocía el historial forestal del respectivo fragmento. Se estableció una parcela en cada fragmento, las que variaron en superficie de 200 a 400 m², considerando que los fragmentos remanentes de bosques de roble sin intervención antrópica son pequeños y con superficies entre 0,5 y 5 ha aproximadamente. Los parámetros dasométricos de estos fragmentos sirvieron como base de datos para derivar la línea de más alta densidad. En cada parcela se midieron todos los árboles vivos con un DAP > 5 cm. Además, a tres árboles, entre dominantes y co-dominantes, se les determinó la edad mediante la obtención de un tarugo (cuadro 1).

Construcción de la guía de manejo de la densidad. Para construir el diagrama de manejo de la densidad, se utilizó el procedimiento de Saunders y Puettmann (2000), en que es necesario distinguir las líneas que se ilustran en la figura 1. Línea biológica absoluta o de máxima densidad A (tamaño-densidad), representa la parcela en que se puede extraer la máxima área basal para una densidad dada. La línea B define el inicio de la mortalidad por competencia, la línea C representa la optimización de la producción del rodal y la línea D, representa la subocupación del sitio (figura 1).

Para obtener el diagrama de manejo de densidad que representa la situación promedio, se estableció la relación tamaño-densidad a partir de la relación alométrica de Reineke (1933), para lo cual, se asignaron los respectivos diámetros cuadráticos medios a las correspondientes densidades de cada parcela y graficando los resultados se originó una nube de puntos que describe las relaciones diámetros cuadráticos medios/densidad encontradas en el universo estudiado. Esta nube de puntos sólo permite construir una línea de regresión que representa el promedio, puesto que un subconjunto de los puntos excede esta línea y es proba-

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las parcelas muestreadas, *N*: densidad (número de árboles por hectárea), *AB*: área basal (m² por hectárea), *dg*: diámetro cuadrático medio (cm), *E*: edad (años), *n*: número de parcelas en rodales de roble, en la región del Biobío.

Descriptive statistic of available plots, *N*: stand density (number of individuals per hectare), *AB*: basal area (m² per hectare), *dg*: quadratic mean stand diameter at breast height (cm), *E*: age (years), *n*: number of plots in stand of roble, in the Biobío Region.

Parámetro	n	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar
<i>N</i>	20	475,0	1.783	4.100	1.061
<i>AB</i>	20	32,4	41,1	54,3	5,5
<i>dg</i>	20	10,2	19,4	31,8	5,9
<i>E</i>	60	9,0	34,0	62,0	10,9

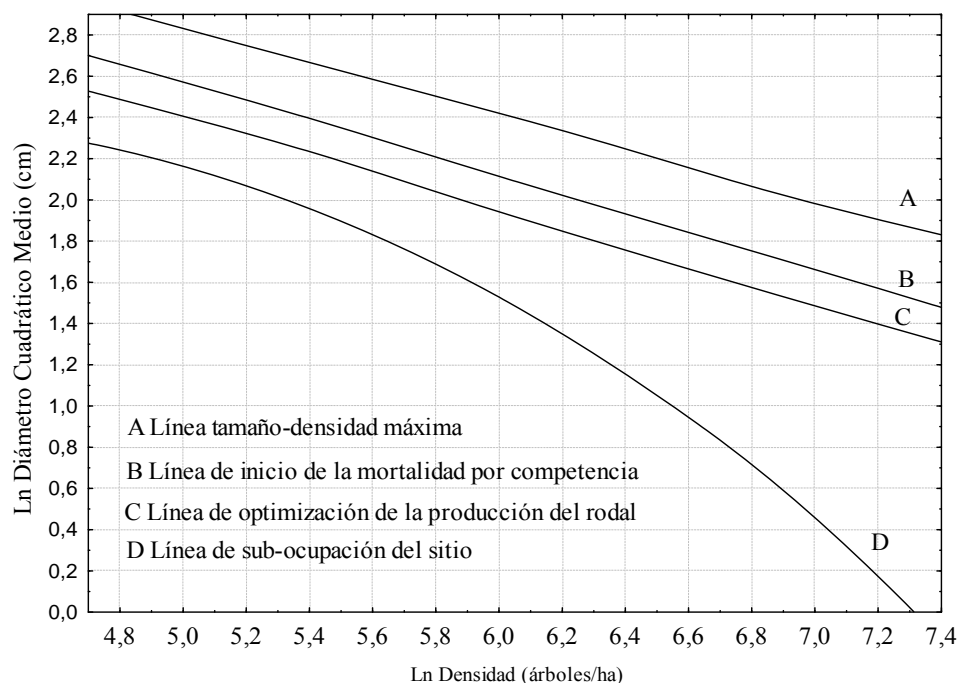


Figura 1. Diagrama de manejo de la densidad. Las líneas A, B y C tienen densidades relativas de 1,00; 0,60 y 0,40, respectivamente (adaptado de Saunders y Puettmann 2000). El rectángulo que se conforma entre las líneas B y C representa la zona de manejo silvícola.

Density management diagram. Lines A, B and C show relative densities of 1.00; 0.60 and 0.40, respectively (adapted from Saunders and Puettmann 2000). Space between line B and C indicates silvicultural management zone.

ble que se encuentren más fragmentos, no detectados en el área de estudio, que también exceden esta línea.

Para obtener la línea de máxima densidad, se modificó el intercepto de la ecuación, para lo cual, se utilizó el límite de confianza de predicción para una nueva observación cuando el parámetro *a* es conocido con un nivel de probabilidad del 68 % (Neter *et al.* 1983). Por ello, cuando los parámetros son conocidos en una distribución normal, los límites de predicción del intervalo de confianza para el valor esperado ($E(Y_h)$), con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$, es (Neter *et al.* 1983):

$$E(Y_h) \pm z\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\sigma \quad [4]$$

Además, optar por un nivel más alto de probabilidad, como por ejemplo 95 %, significaría orientar el diagrama de densidad, por un par de puntos de posición excepcionalmente alto en el sistema de coordenadas, debido a una combinación de factores del sitio que no constituye un patrón razonable, sino que para sitios excepcionales.

De acuerdo con Powell (1999), es recomendable para rodales coetáneos existentes, utilizar la línea de máxima densidad observada para una especie en particular, como es el caso de este estudio. Por tanto, como el concepto de manejo implica evitar la mortalidad de árboles de clases de copa inferiores, la obtención de la línea de inicio de la mortalidad y el límite inferior de la zona óptima de ma-

nejo del rodal, se obtuvo utilizando estimaciones teóricas de densidad relativa de 0,60 y 0,40 respectivamente, de la línea de máxima densidad (Drew y Flewelling 1977, Farn-den 1996, Powell 1999, Saunders y Puettmann 2000).

Asimismo, la curva de área basal máxima corresponde a la curva de máxima densidad, esto es, cuando es 1,00. Se calculó como:

$$AB_{max} = \frac{\pi}{40.000} N_{max} \left(\frac{N_{max}}{\exp(a_{max})} \right)^{\frac{2}{b}} \quad [5]$$

En que es el intercepto de la regresión para la relación tamaño-densidad cuando la curva es 1,00. De la misma forma, las áreas basales en las líneas de inicio de la mortalidad y de máxima producción del rodal, se obtuvieron utilizando estimaciones teóricas de densidad relativa de 0,60 y 0,40, respectivamente (Farnden 1996, Saunders y Puettmann 2000).

Estimación del índice de densidad del rodal (IDR). La base para calcular el IDR es la relación entre la densidad esperada del rodal (N) y el diámetro cuadrático medio (dg), se estimó bajo la relación siguiente (Pretzsch 2002):

$$IDR = N_{max} (25)^{-b} \quad [6]$$

Como ya ha sido informado, de acuerdo con la relación alométrica de Reineke (1933), el parámetro b tomó un valor original de -1,605. Sin embargo, este valor no se puede considerar como absoluto para todas las poblaciones biológicas (Pretzsch 2002), el valor de b , se obtuvo de la relación tamaño-densidad determinada en este estudio.

Las estimaciones de parámetros se obtuvieron mediante el procedimiento de modelos lineales generales de SAS Versión 8 (SAS Institute 1999).

Validación del diagrama en terreno. Para la validación del diagrama de densidad, se desarrolló una matriz que relacionó la cobertura de copas, estimada en terreno en base al esquema de descripción narrativa descrita por Muller Using *et al.* (2013) con la línea de densidad obtenida por el diagrama, utilizando parcelas de 10 rodales distintos.

Se definieron tres niveles de abertura de copas: cerrado a semicerrado, cerrado con huecos y semicerrado a semia-bierto. A su vez, se definieron tres niveles de línea de densidad: mayor de 0,5, entre 0,4 y 0,5 y menor de 0,4. En cada rodal, se compararon cada nivel de abertura de copas y su respectivo nivel de densidad. En caso de coincidencia se registraron como casos de acierto y, en caso contrario de no acierto del diagrama de densidad.

RESULTADOS

El modelo de ajuste para la relación tamaño-densidad para roble, resultó con una alta capacidad de explicación de la proporción de varianza explicada por el modelo ($R^2 = 0,952$ y $P \leq 0,0001$) y las pruebas realizadas en los residuos detectaron independencia y normalidad en su distribución. Los resultados del modelo se presentan en el cuadro 2. De esta forma, la ecuación es:

$$\ln(N) = 12,9675 - 1,93341 * \ln(dg) \quad [7]$$

Sin embargo, en este modelo se observó un subconjunto de parcelas que se ubican sobre la línea de densidad máxima en el diagrama. De acuerdo a la metodología descrita anteriormente, el intercepto del modelo para roble en la zona centro-sur, basado en los datos disponibles, se corrigió considerando la probabilidad de encontrar un fragmento con una mayor densidad que las encontradas en las parcelas estudiadas. Por tanto, la función tamaño-densidad máxima (N_{max}) es:

$$\ln(N_{max}) = 13,1111 - 1,93341 * \ln(dg) \quad [8]$$

Es así que el diagrama de densidad resultante se construyó con la nueva línea de máxima densidad que se presenta en la figura 2. A partir de la función tamaño-densidad, se obtuvieron los valores para la línea de densidad máxima, línea de inicio de la mortalidad y la densidad de máxima producción del rodal (figura 3, cuadro 3). Del mismo diagrama de densidad, se obtuvieron los valores de área basal máxima y mínima a dejar en rodales de roble (cuadro 4). Finalmente, el valor de máximo de IDR obtenido fue de 980,2 (árboles ha⁻¹).

Cuadro 2. Coeficientes de la regresión lineal (los valores de N y dg fueron transformados a logaritmos naturales) para la relación tamaño-densidad en rodales de roble, en la región del Biobío.

Coefficients of the linear regression (values of N and dg were transformed into natural logarithmic) for size-density relationship in stand of roble, in the Biobío Region.

Parámetro	Valor	Error estándar	I.C.		Valor PLnN
			-95,00%	+95,00%	
Intercepto	12,9675	0,299705	12,33785	13,59716	0,000000
b	-1,93341	0,102004	-2,14771	-1,7191	0,000000

Nota: IC es el intervalo de confianza para un 95%.

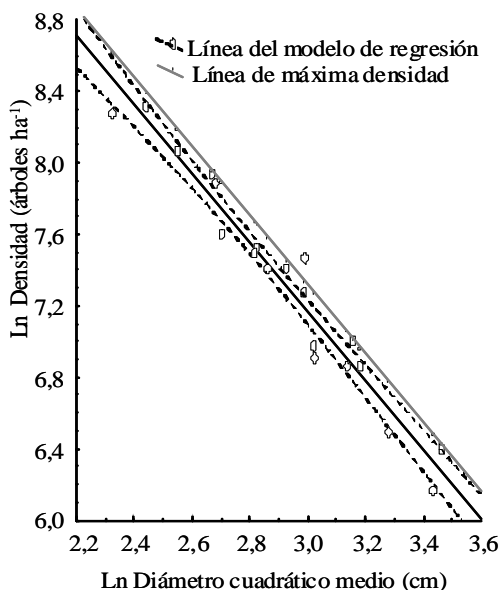


Figura 2. Ajuste del modelo de Reineke (1933) entre el diámetro cuadrático medio (d_g) y la densidad del rodal (N) en rodales de roble, región del Biobío (la línea segmentada es el límite de confianza del modelo de regresión).

Reineke's (1933) fitted model between quadratic mean stand diameter at breast height and stand density in stand of roble, in the Biobío Region (segmented line is the confidence band for regression line).

Cuadro 3. Valores de la línea densidad máxima, línea de inicio de la mortalidad y la densidad de máxima producción del rodal en relación al diámetro cuadrático medio en rodales de roble, región del Biobío.

Values of maximum-size density line values, the mortality initiation line and maximum stand production line in stand of roble, in the Biobío Region.

d_g (cm)	Máxima densidad (árboles ha^{-1})	Densidad de inicio de la mortalidad (árboles ha^{-1})	Densidad de máxima producción del rodal (árboles ha^{-1})
10	5.764	3.458	2.305
12	4.051	2.431	1.621
14	3.007	1.804	1.203
16	2.323	1.394	929
18	1.850	1.110	740
20	1.509	905	604
22	1.255	753	502
24	1.061	636	424
26	909	545	363
28	787	472	315
30	689	413	276
32	608	365	243
34	541	325	216
36	484	291	194
38	436	262	174
40	395	237	158

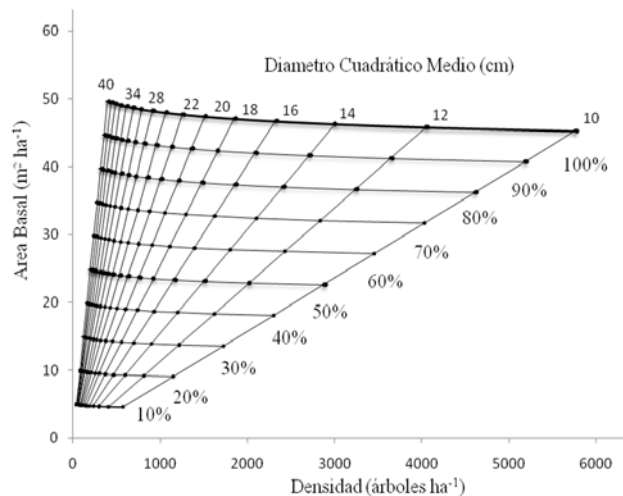


Figura 3. Diagrama de densidad en rodales de roble en la región del Biobío.

Density management diagram, in stand of roble, in the Biobío Region.

Cuadro 4. Área basal máxima y mínima sugerida a dejar en rodales de roble, región del Biobío.

Maximum and minimal basal area residual suggested in stands of roble, in the Biobío Region.

d_g (cm)	Área basal ($m^2 ha^{-1}$)	Área basal máxima ($m^2 ha^{-1}$)	Área basal mínima ($m^2 ha^{-1}$)
	100%	60%	40%
10	45,27	27,16	18,11
12	45,82	27,49	18,33
14	46,29	27,78	18,52
16	46,71	28,02	18,68
18	47,07	28,24	18,83
20	47,41	28,44	18,96
22	47,71	28,62	19,08
24	47,98	28,79	19,19
26	48,24	28,94	19,30
28	48,48	29,09	19,39
30	48,70	29,22	19,48
32	48,91	29,35	19,57
34	49,11	29,47	19,64
36	49,30	29,58	19,72
38	49,48	29,69	19,79
40	49,64	29,79	19,86

Validación en terreno. El modelo utilizado para la validación del diagrama de densidad, demostró que en terreno presentó una alta tasa de aciertos (cuadro 5). Se aprecia que de 10 rodales validados, el diagrama de densidad tuvo nueve aciertos y sólo un desacierto.

Cuadro 5. Matriz de validación en terreno del diagrama de densidad.

Validation matrix of density diagram in the field.

Abertura de copas	Línea de densidad del diagrama			Aciertos	No aciertos
	1	2	3		
1	4	0	1	4	1
2	0	2	0	2	0
3	0	0	3	3	0

DISCUSIÓN

Obtención de la línea de máxima densidad. La ley de autorraleo descrita por Reineke (1933) describe la influencia de la competencia sobre la estructura del rodal (Perry 1984) y ayuda a comprender la capacidad competitiva intraespecífica del rodal. La forma y parámetros de esta ley, presentados en la ecuación 1 pueden ser discutidos en dos aspectos: estadísticos y biológicos (Zeide 2005). Desde el punto de vista estadístico la relación alométrica de Reineke (1933) se basó en la relación (árboles ha⁻¹) y tamaño del árbol en condiciones de plena densidad. Sin embargo, la presencia de claros en poblaciones naturales de bosques y el entrecruzamiento de las ramas de las copas no cumplen con los requisitos de la ley de Reineke (1933). Por lo cual, se ha sugerido reestudiar los parámetros de la ecuación 1 para una especie en particular y en condiciones de sitios específicos, mediante métodos estadísticos (Ducey y Larson 2003).

Desde el punto de vista biológico, la pendiente de la ecuación 1 refleja la relación entre mortalidad y el desarrollo de los árboles que sobreviven al autorraleo. En este sentido, una pendiente más pronunciada (más negativa) indica una menor tasa de crecimiento, que pendientes más suaves. Un mayor crecimiento significa que aumente la biomasa total del árbol, o que aumente la biomasa de un componente en particular, especialmente el fuste (Perry 1984).

La ley de Reineke (1933) tiene dos características notables: *i*) aunque el intercepto y la pendiente de la ecuación 1 varían entre especies, la magnitud de esta variación es pequeña y *ii*) para una especie dada existen variaciones que se relacionan con el sitio, lo que es explicado por el intercepto (Perry 1984). En un estudio más reciente Pretzsch y Bieber (2005) han demostrado en diversas especies creciendo en Alemania, diferencias significativas en los valores de la pendiente de *Fagus sylvatica* L. con respecto a las especies *Picea abies* [L] Karst., *Pinus sylvestris* L. y *Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl. A su vez, estas diferencias fueron también significativas con respecto al valor de Reineke (1933) de -1,605, excepto para *P. sylvestris*. Por tanto, no parece sorprendente que en este estudio la pendiente de la relación de Reineke presente diferencias significativas (valor *P*) para roble en la región del Biobío.

A su vez, para obtener las líneas de más alta densidad en estudios locales, se utilizan parcelas definidas aleato-

riamente de bosques remanentes sin alteración evidente, como evidencia la ausencia de tocones y patrones de mortalidad evidente de individuos suprimidos, en los que no se indica si las parcelas provienen de un solo fragmento de bosque o si se obtienen más parcelas de un mismo fragmento. Por ello, los criterios para la obtención de los datos pueden depender del investigador. Por otra parte, la línea de más alta densidad se ha obtenido aumentando la magnitud del intercepto, en base a tres criterios: *i*) incrementar el intercepto en 1,96 desviaciones estándar del modelo (Wittweg *et al.* 1998), *ii*) incrementar el intercepto utilizando el punto con mayor residuo positivo (Saunders y Puettmann 2000) y *iii*) incrementar el intercepto utilizando el límite de confianza de predicción para una nueva observación, cuando el parámetro *a* es conocido para un nivel de confianza dado (Neter *et al.* 1983). Por tanto, las técnicas de muestreo y metodologías utilizadas, han sido variadas tanto en estudios internacionales (Chauchard *et al.* 1999, Pretzsch 2002) como en nacionales (Gezan *et al.* 2007).

Aún con estas limitaciones metodológicas, es posible inferir algunas consideraciones que pudieran tener efectos prácticos en el diseño del raleo, puesto que las pendientes son comparables. Este estudio, no presentó diferencias con respecto a la pendiente de la relación tamaño-densidad determinada por Chauchard *et al.* (1999), aun cuando sea válida con diámetros promedios superiores a 30 cm. Sin embargo, este estudio presentó diferencias en la pendiente y la línea de más alta densidad propuesta en los trabajos de Gezan *et al.* (2007) y la actual normativa de CONAF (1993), cuya información proviene básicamente de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y de Los Lagos, presentada en la figura 4. A su vez, Puente *et al.* (1979) aunque no utiliza la metodología empleada por Chauchard *et al.* (1999) y Gezan *et al.* (2007), proporciona una curva de tamaño-densidad que es útil para compararse con este estudio.

Por tanto, la pendiente más negativa encontrada en este estudio, indicativa de menores tasas de desarrollo, muestra que la región del Biobío presenta condiciones de sitio inferiores a las regiones del sur y explican que los diagramas utilizados para las prescripciones de raleo, no concuerden con los niveles de densidad mínima en terreno. Este hecho, constituye la base para una discusión más profunda respecto de las metodologías utilizadas y la necesidad de emplear diagramas de manejo de densidad para la aplicación de esquemas de raleo en roble, de acuerdo a condiciones de sitios específicos.

Implicancias silvícolas. De acuerdo al cuadro 3, las densidades en las cuales se pueden aplicar las intervenciones de raleo en la región del Biobío, quedan propuestas entre los límites del 60 y 40 % de la línea de máxima densidad y concuerdan con la recomendación de Farnden (1996) para especies boreales de Canadá. En este caso, se fundamenta por el hecho que todos los rodales no manejados, que fueron la base de este estudio, se encontraron sobre la línea del 60 %. Con respecto a la línea de mínima densidad, se fijó en 40 % para proporcionar un margen de seguridad

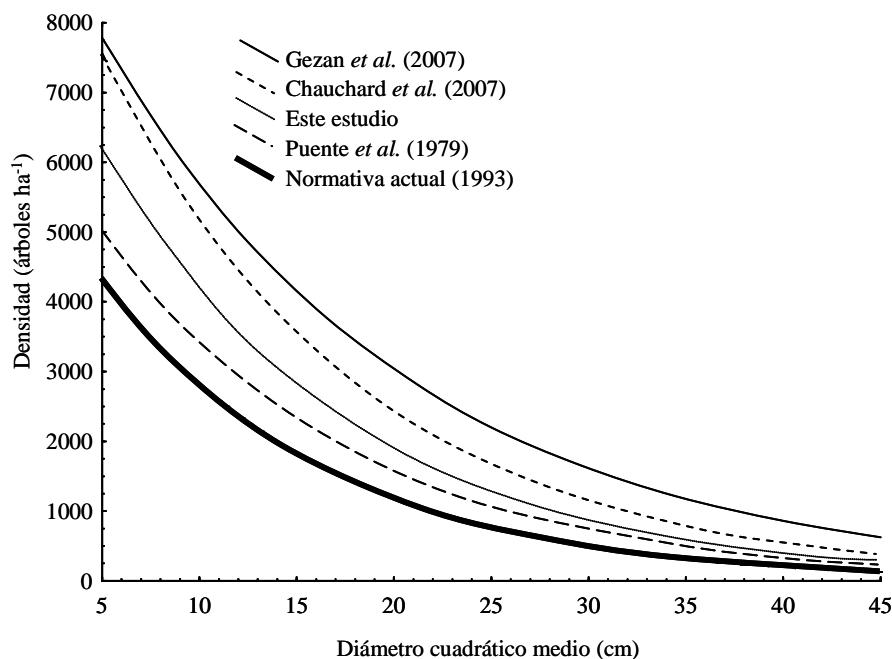


Figura 4. Comparación de las relaciones tamaño-densidad para rodales de roble, en la región del Biobío.
Comparison of several relationships for mixed stands in stand of roble, in the Biobío Region.

considerando el riesgo que rodales intervenidos por raleos queden en una condición de muy baja densidad, limitándose su capacidad de resiliencia. Además, con estas densidades y bajo la premisa de no intervenir bajo el límite del 40 % de la línea máxima densidad (cuadro 3), no es factible efectuar más de dos raleos dentro del período de una década. De lo contrario, las intervenciones pudieran exceder lo silvícolamente sustentable. Esta proposición, además se sustenta en lo informado por Lara *et al.* (2000) que renovales de roble creciendo en el límite sur de la región del Biobío presentan bajas tasas de crecimiento, puesto que no exceden en dg de $0,33 \text{ cm año}^{-1}$ y áreas basales de $0,48 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para distintas intensidades de raleo.

Por otra parte, se ha encontrado en muchos estudios con especies en Europa que las extracciones en área basal pueden ser más intensas en edades menores que a edades mayores, ya que se ha fundamentado que la respuesta de un rodal al cierre de copas, después de tales intervenciones, decrece con el desarrollo de la edad. De esta forma, las intervenciones estandarizadas en tablas de rendimiento para la mayoría de las especies en Alemania, están concebidas como “dinámicas”, es decir, prescriben raleos más fuertes en la etapa juvenil de un rodal, los que se reducen al avanzar en edad (Röhrig *et al.* 2006), intervenciones que pueden tener aplicación en el caso de la prescripciones de raleos para roble en Chile.

Dada la situación que una superficie importante de los renovales de *Nothofagus spp.*, se encuentran en la fase de lenta reacción en la respuesta al raleo, por su estado desarrollo más avanzado, se sugiere reducir el número de intervenciones en estas masas a solo una por década.

Otro aspecto silvícola relevante, está referido a los rodales biestratificados, en que bajo el estrato de *Nothofagus spp.* o dominante se distingue un estrato conformado por especies siempreverdes. Si el estrato inferior está en una condición de suprimido, no debiera ser considerado en las densidades del rodal a ralear, ya que se trata de dos poblaciones distintas que al sumar sus densidades le quitan el sentido al uso de diagramas de densidad.

Además, al unir las densidades de ambos doseles en una sola densidad mínima, puede ser contrario al espíritu de la normativa forestal chilena, ya que, por una parte, un rodal se puede considerar (o manipular) apto para raleo sin tener un número suficiente de árboles de *Nothofagus spp.* que compitan en el estrato superior, tan sólo por el hecho de agregar a ellos una cantidad de árboles de los estratos suprimidos. Por otra parte - con la ayuda de los diámetros delgados de los estratos inferiores - se puede disminuir aritméticamente el diámetro del rodal, permitiendo bonificar por la ley chilena, casos en que no se justifica la subvención estatal.

CONCLUSIONES

La construcción de diagramas de densidad, a partir de la línea de más alta densidad, constituye una herramienta útil y práctica para el control de la densidad. En este estudio, se determinaron diferencias significativas en las pendientes de la línea de más alta densidad con trabajos previos desarrollados en el país, lo que se atribuye a enfoques metodológicos distintos y zonas de crecimiento diferentes. La pendiente en la relación alométrica tamaño-densidad más negativa encontrada en este estudio con respecto a otros trabajos

desarrollados en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, es indicativa de menores niveles de desarrollo de roble debido a calidades de sitio inferiores. Ello sugiere la necesidad de homogenizar las metodologías y construir estos diagramas para una misma especie de acuerdo a zonificaciones edafoclimáticas. Con base en el diagrama de densidad construido, se sugieren medidas silvícolas específicas para la región del Biobío, que permitan un manejo del raleo en renovales de roble con una silvicultura sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el valioso aporte del Profesor Pedro Real, en la metodología para establecer la línea de máxima densidad.

REFERENCIAS

- Ando T. 1968. Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand. *Tokyo Government Forest Experiment Station Bulletin* 210: 1-153.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 1993. Manual de procedimientos para normas de manejo aplicables a faenas de raleo en tipo forestal de Ro-Ra-Co (roble-raulí-coihue). Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 25 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2011. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios y actualizaciones. Período 1997 - 2011. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 30 p.
- Chauchard L, R Sbrancia, M González, L Maresca, A Rabino. 1999. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$ o ley de autoraleo. *Bosque* 20(2): 79-94.
- Dean TJ, VC Baldwin. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. New Orleans, LA, U.S. Res. Pap. SO-275. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 12 p.
- Drew TJ, JW Flewelling. 1977. Some Recent Japanese Theories of Yield-Density Relationships and their Application to Monterey Pine Plantations. *Forest Science* 23: 517-534.
- Ducey MJ, BC Larson. 2003. Is There a Correct Stand Density Index? An Alternate Interpretation. *Western Journal of Applied Forestry* 18: 179-184.
- Farnden C. 1996. Stand density management diagrams for lodgepole pine, white spruce and interior Douglas-fir. Victoria, BC. Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Information Report BC-X-360. 41 p.
- Gezan SA, A Ortega, E Andenmatten. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 28(2): 97-105.
- Kira T, H Ogawa, K Sakazaki. 1953. Intraspecific competition among higher plants. I. Competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed populations *Journal of Institute of Polytechnics, Osaka City University Series D4*: 1-16.
- Lara A, CD Zegers, C Echeverría. 2000. Guía de ensayos silviculturales permanentes en los bosques nativos de Chile. Valdivia, Chile. World Wildlife Fund. Instituto de Silvicultura, Universidad Austral de Chile. 242 p.
- Müller-Using S, B Müller-Using, M Martin, H Grosse, R Mujica. Estado actual y modelos silvícolas para los renovales de *Nothofagus* en la zona centro sur de Chile. Valdivia, Chile. Instituto Forestal. 32 p.
- Nawrath O. 2001. Evaluación de la norma de manejo de renovales en el tipo forestal roble-raulí-coigüe, de la provincia de Arauco. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 23 p.
- Neter J, MH Kutner, W Wasserman, C Nachtsheim. 1996. Applied linear regression models. Boston, New York, USA. McGraw-Hill/Irwin. 1408 p.
- Perry DA. 1984. A model of physiological and allometric factors in the self-thinning curve. *Journal of Theoretical Biology* 106: 383-401.
- Powell DC. 1999. Suggested stocking levels for forest stands in northeastern Oregon and southeastern Washington: An implementation guide for the Umatilla National Forest. Oregon. United State of America. USDA Forest Service. Pacific Northwest Region. Report F14-SO-TP-03-09. 81 p.
- Pretzsch H. 2002. A Unified Law of Spatial Allometry for Woody and Herbaceous Plants. *Plant Biology* 4: 159-166.
- Pretzsch H, P Biber. 2005. A re-evaluation of Reineke's Rule and Stand Density Index. *Forest science*. 51: 304-320.
- Puente M, C Donoso, R Peñaloza, E Morales. 1979. Estudio de raleos y otras técnicas para el manejo de renovales de raulí y roble. Etapa I: Identificación y caracterización de renovales de raulí y roble. Informe de convenio N° 5. Proyecto CONAF/PNUD/FAO-CHI. Santiago, Chile. CONAF. 128 p.
- Puettmann KJ, DE Hibbs, DW Hann. 1992. The Dynamics of Mixed Stands of *Alnus rubra* and *Pseudotsuga menziesii*: Extension of Size-Density Analysis to Species Mixture. *Journal of Ecology* 80: 449-458.
- Reineke LH. 1933. Perfecting a stand-density index for even aged forest. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Röhrig E, N Bartsch, B von Lüpke. 2006. Waldbau auf ökologischer Grundlage. Berlin, Deutschland. Utb. 479 p.
- SAS Institute (Statistical Analysis Systems, US). 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. Cary, NC. SAS Institute Inc. 4420 p.
- Saunders MR, KJ Puettmann. 2000. A preliminary white spruce density management diagram for the lake states. St. Paul, Minnesota, USA. College of Natural Resources and Minnesota Agricultural Experiment Station, University of Minnesota. 145 p.
- Wittweg R, T Lynch, M Huebschmann. 1997. Stand density index for shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) natural stand. In Proceedings of the ninth biennial southern silvicultural research conference, Asheville, NC, U.S.A. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 590-596 p.
- Yoda K, T Kira, H Ogawa, K Hozumi. 1963. Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology, Osaka City University* 14: 106-129.
- Zeide B. 2005. How to measure stand density. *Trees* 19: 1-14.

