

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/282362934>

Diagrama de manejo de la densidad de rodal para el control del tamaño de ramas basales en bosques septentrionales altoandinos dominados por roble en la Región del Maule

TECHNICAL REPORT · OCTOBER 2015

READS

218

1 AUTHOR:



Patricio Corvalan

University of Chile

22 PUBLICATIONS 37 CITATIONS

SEE PROFILE

Diagrama de manejo de la densidad de rodal para el control del tamaño de ramas basales en bosques septentrionales altoandinos dominados por roble en la Región del Maule

Patricio Corvalán Vera



Diagrama de manejo de la densidad de rodal para el control del tamaño de ramas basales en bosques septentrionales altoandinos dominados por roble en la Región del Maule

Patricio Corvalán V.
Ingeniero Forestal, Mg.,
Universidad de Chile

Agosto, 2015
Santiago, Chile

DIAGRAMA DE MANEJO DE LA DENSIDAD DE RODAL PARA EL CONTROL DEL TAMAÑO DE RAMAS BASALES EN BOSQUES
SEPTENTRIONALES ALTOANDINOS DOMINADOS POR ROBLE EN LA REGIÓN DEL MAULE
Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza
Departamento Gestión de Bosques y su Medio Ambiente
Patricio Corvalán Vera

ISBN: 978-956-358-953-5
500 ejemplares
Septiembre de 2015

Diseño e impresión
Andros Impresores
www.androsimpresores.cl

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Investigación del Bosque Nativo por haber confiado y financiado este proyecto.

El proyecto agradece el valioso aporte del Sr. Juan Pablo Castillo Errázuriz por facilitar el acceso y uso del predio Monte Oscuro para la medición de los rodales, así como el volteo y trozado de árboles para la medición de crecimientos.

De igual forma se agradece al Sr. Jesús Ceresuela, administrador del predio Los Temos y a sus propietarios por facilitar el acceso y medición de los árboles del potrero Los Roces.

A los colegas Ricardo Navarro y Germán Urrea por haber realizado los contactos para acceder al predio Los Temos.

A Tamara Valenzuela por su fundamental y valiosa participación en el proyecto.

A Diego González por la delicada y tediosa medición de anillos de crecimiento.

A Christian Salas por su colaboración en el ajuste de modelos.

A Leonel Valenzuela, Margarita Fariña, Catalina Izquierdo, Gonzalo Riquelme y tantos otros que participaron en la toma de datos.

A Eduardo Lazo, baqueano y permanente colaborador en la toma de datos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Los diagramas de manejo de la densidad	15
2.2. Los componentes del diagrama de densidad	18
3. HIPÓTESIS	30
4. OBJETIVOS	31
4.1. Objetivo general	31
4.2. Objetivos específicos	31
5. METODOLOGÍA	32
5.1. Materiales	32
5.2. Método	39
6. RESULTADOS	50
6.1. Línea de cierre de copas	50
6.2. Línea de auto-raleo	51
6.3. Línea de control del tamaño de ramas	52
6.4. Línea de inicio de mortalidad por competencia	60
6.5. Isolíneas de volumen y diámetro medio cuadrático	63
6.6. Diagrama de manejo de la densidad	65
6.7. Modo de aplicación del diagrama	67
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
7.1. Línea de cierre de copas	70
7.2. Línea de auto-raleo	71
7.3. Línea de control del tamaño de ramas	74
7.4. Línea de inicio de mortalidad por competencia	76
7.5. Isolíneas de volumen y diámetro medio cuadrático	78
7.6. Diagrama de manejo de la densidad	79
8. CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	84

ANEXO 1	93
ANEXO 2	104
ANEXO 3	111
ANEXO 4	118

Índice de Tablas

Tabla 5.1. Resumen de temperaturas medias mensuales en la estación General Freire, Curicó	34
Tabla 6.1. Parámetros estimados de los modelos de diámetro de copa	50
Tabla 6.2. Línea de cierre de copas para roble, VII Región	51
Tabla 6.3. Estadísticas descriptivas de los rodales y de los árboles	53
Tabla 6.4. Matriz de correlación y significación estadística	56
Tabla 6.5. Parámetros y bondad de ajuste del modelo (27)	57
Tabla 6.6. Parámetros y bondad de ajuste del modelo (28)	58
Tabla 6.7. Estadísticas del crecimiento anual periódico de los rodales	60
Tabla 6.8. Matriz de correlaciones de Pearson y nivel de significación entre CAP y parámetros de rodal	61
Tabla 6.9. Crecimiento anual periódico según nivel de densidad relativa	63

Índice de Figuras

Figura 2.1. Diagrama de manejo de la densidad para pino oregón	16
Figura 2.2. Trayectoria de la línea tamaño densidad	24
Figura 2.3. Relación entre el espaciamiento, el DAP y el tamaño de ramas	27
Figura 2.4. Evaluación de una estrategia de raleo usando un DMD	28
Figura 5.1. Ubicación geográfica del área de estudio	32
Figura 5.2. Tendencia de las precipitaciones mensuales en Monte Oscuro y Los Queñes	35
Figura 5.3. Tendencia de las precipitaciones anuales en Monte Oscuro y Los Queñes	35
Figura 5.4. Diseño inventario 2011	37
Figura 5.5. Distribución de <i>clusters</i> en Monte Oscuro, inventario 2011	37
Figura 5.6. Diseño inventario 2013	38
Figura 5.7. Distribución de <i>clusters</i> en Monte Oscuro, inventario 2013	38
Figura 7.1. Comparación entre zonas de crecimiento Langsaeter y este estudio	76

Índice de Gráficos

Gráfico 6.1. Diagrama de dispersión de diámetros máximos por deciles	54
Gráfico 6.2. Porcentaje de árboles clasificados según grado de vitalidad de acuerdo a la ubicación de las primeras ramas muertas y vivas	55

Gráfico 6.3. Modelos de estimación de diámetros de rama fijos en función de la densidad de los rodales	57
Gráfico 6.4. Modelos de estimación de cilindros nudosos de ramas vivas y muertas	59
Gráfico 6.5. Modelos de crecimiento en volumen como función del rango intercuartilíneo para diferentes niveles de densidad relativa de los rodales	62
Gráfico 6.6. Diagrama de manejo de la densidad para roble. Todo el rango diamétrico	66
Gráfico 6.7. Diagrama de manejo de la densidad. Diámetro medio cuadrático superior a 20 cm	66
Gráfico 6.8. Ejemplo de uso DMD	69
Gráfico 7.1. Comparación de ecuaciones de diámetro de copa en latifoliadas	71
Gráfico 7.2. Línea de auto-raleo ajustada por mínimos cuadrados ordinarios y por regresión estocástica de frontera junto a parcelas de inventario forestal y de auto-raleo	72
Gráfico 7.3. Trayectoria de densidad máxima según varios autores	73
Gráfico 7.4. Crecimiento anual periódico de árboles según origen	77

Se construyó un diagrama de manejo de la densidad para los renovales dominados por *Nothofagus obliqua* (roble) que crecen en la precordillera de Maule, basados en la dinámica natural de crecimiento y competencia. El diagrama está constituido por las líneas de cierre de copa, auto-raleo y control del tamaño de ramas, así como de la zona de crecimiento mínimo. Se complementa el diagrama con las isolíneas de volumen total y altura dominante que integradas al diagrama permiten al usuario conectar el estado actual del rodal con un estado futuro deseado y así evaluar en forma recursiva esquemas de raleo que permitan mejorar el tamaño y la calidad de la madera de un primer trozo de 3,6 m con fines industriales. La densidad de manejo óptima se encuentra sobre la línea de control del tamaño de ramas y en la zona de crecimiento volumétrico mínimo del rodal. Las variables independientes del modelo son el número de árboles por hectárea, el diámetro medio cuadrático y la altura dominante, y las variables dependientes, el volumen por hectárea, y el tamaño máximo de ramas.

Las muestras para la construcción del diagrama se colectaron en un área experimental de 1.600 hectáreas, aproximadamente, en dos zonas geográficas de trabajo, donde se seleccionaron unidades dasométricas y dendrométricas. Los modelos probados en la construcción del diagrama fueron los tradicionales, a los que se agregaron algunos nuevos propuestos en este trabajo.

El crecimiento de los renovales de roble está positiva y significativamente correlacionado con la densidad relativa del rodal, sin presentar valores declinantes. De igual forma, la densidad relativa del rodal afecta de modo significativo el tamaño de las ramas en la troza basal, requiriendo densidades relativas sobre el 72% para el control del tamaño de nudos de 3 cm y sobre el 31% para 4 cm. No es posible controlar nudos de tamaño 1 y 2 cm con el manejo de la densidad. La especie presenta ramas grandes, pudiendo permanecer muertas en el árbol en pie y sin caer hasta por un período de 8,5 años en promedio. Para obtener madera libre de nudo sin podas artificial en la troza basal se requiere tener diámetros normales (*DAP*) superiores a 25 cm, y en el proceso de oclusión de ramas muertas se pierden entre 3 y 5 cm de diámetro de madera libre de nudos como mínimo.

El modelo basado en parcelas temporales sugiere el desarrollo de estrategias de raleo suaves y frecuentes para mantener las mayores tasas de crecimiento posibles y contener el desarrollo de las ramas basales. Sin duda la poda artificial surge como una alternativa para aumentar la intensidad del raleo una vez contenidas las ramas basales. Para transformar este modelo de estático a uno dinámico se sugiere el establecimiento de ensayos de poda y raleo con parcelas permanentes a partir de estrategias evaluadas con este diagrama.

Los renovales no siguen el desarrollo propuesto por Langsaeter en 1941, por lo que los diagramas clásicos no son aplicables a la especie, ya que por su origen y estructura alcanzan su máximo crecimiento anual periódico en volumen neto con la mayor densidad posible. En este trabajo se propone un nuevo modelo de diagrama de manejo de la densidad en el que se reemplaza la inminente mortalidad por competencia por el control de la tasa de crecimiento del rodal.

Entre los resultados más notables destacan que tanto la línea de auto-raleo como la línea de cierre de copas son superiores a los reportados en trabajos similares realizados en *Nothofagus* tanto en Chile como Argentina. No existe para la línea de control de ramas ningún estudio que haya reportado mediciones directas con los cuales se pueda comparar este estudio.

No fue posible establecer el efecto del sitio en el diagrama basado en el concepto de *site form*, debido a la imprecisión que genera la medición de altura total con los métodos tradicionales. Tampoco fue posible, por la naturaleza de los datos, determinar las curvas tamaño-densidad que permiten con propiedad hacer uso dinámico del diagrama. Por ello se sugiere usar el diagrama con cautela, debido a que es un modelo estático.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques septentrionales dominados por *Nothofagus obliqua* (roble), presentes en la Región del Maule, alcanzaban al 2011 a 305.000 hectáreas distribuidos igualmente entre los tipos forestales roble-hualo y roble-raulí-coigüe (CONAF, 2011). En Chile, la producción de madera aserrada de especies nativas ha declinado desde 176,8 a 116,6 mil m³ entre 2004 y 2013, teniendo el roble una participación del 21,3 % del total nacional (INFOR, 2012). El roble fue históricamente sometido a una alta tasa de extracción, utilizándose principalmente en la producción de postes, madera de construcción, durmientes, minería, muelles, embarcaderos, construcción naval y otros usos donde se requería alta durabilidad y resistencia (Haig *et al.*, 1946).

El origen actual de esos bosques es, en su mayoría, de renoval o bosque secundario. En el tipo forestal roble-raulí-coigüe, que en la Región del Maule alcanza a 330.200 hectáreas, los árboles rectos no sobrepasan el 30% en las clases diamétricas inferiores a 32 cm de diámetro a la altura de pecho (*DAP*) y 40% en clases diametrales superiores. También presenta distintos grados de curvatura e inclinación (INFOR, 2011). Esto hace evidente la estructura irregular en que se forman a partir del rebrote de las cepas.

La baja o nula rentabilidad del bosque nativo unido a la necesidad de recuperar el potencial productivo maderero y revertir su proceso de deterioro ha sido la causa de la promulgación de la Ley N° 20.283 relativa a recuperación y fomento forestal del bosque nativo, que bonifica las actividades silviculturales de acuerdo con normas preestablecidas. Hoy el interés económico maderero es cada vez menor y representa una seria limitación para la mantención de estos bosques. Su manejo constituye una herramienta clave para la preservación.

El manejo orientado a la producción maderera en los bosques dominados por roble –de productividad baja a media en su extensión septentrional, debido a su condición de clima mediterráneo en Chile (Donoso, 1982)– plantea a sus productores el desafío de intervenir la estructura inicial del bosque concentrando el crecimiento del volumen en los mejores ejemplares, cortando una proporción no despreciable de individuos hasta la cosecha final con altas limitaciones presupuestarias, aun haciendo uso de las bonificaciones contempladas en la Ley N° 20.283. Consecuentemente, no es poco probable que

las intervenciones sean intensas, ya que las bonificaciones que otorga la ley son acotadas.

La gran diversidad de estados estructurales iniciales en que se encuentran los renovales unido a la necesidad de formular modelos generales de manejo y la ausencia de información acerca de la dinámica y tratamientos silvícolas de estos bosques son los que han motivado el desarrollo del presente trabajo. El supuesto básico que hay detrás es que tanto los árboles como los rodales que crecen en distintos estados de desarrollo y densidad entregan información suficiente para construir modelos que sirvan de guía para simular las respuestas a los cambios que, eventualmente, se producirían al intervenirlos. En consecuencia, un modelo de este tipo tiene altas incertezas cuando es usado como si fuera dinámico. En general, la silvicultura produce cambios sustancialmente más intensos que los que se producen en la naturaleza y ese efecto queda fuera de control en un modelo de este tipo. El modelo marca solo las tendencias naturales y por ello debe ser utilizado con cautela.

En este proyecto se construye un diagrama de manejo de la densidad que se expresa como una relación gráfica entre las variables simples y fáciles de medir que son las variables independientes y aquellas más complejas y dependientes que son las que se desean obtener o controlar. El diagrama permite el diseño, desarrollo y evaluación de regímenes de densidad alternativos para alcanzar las condiciones del rodal deseado a futuro.

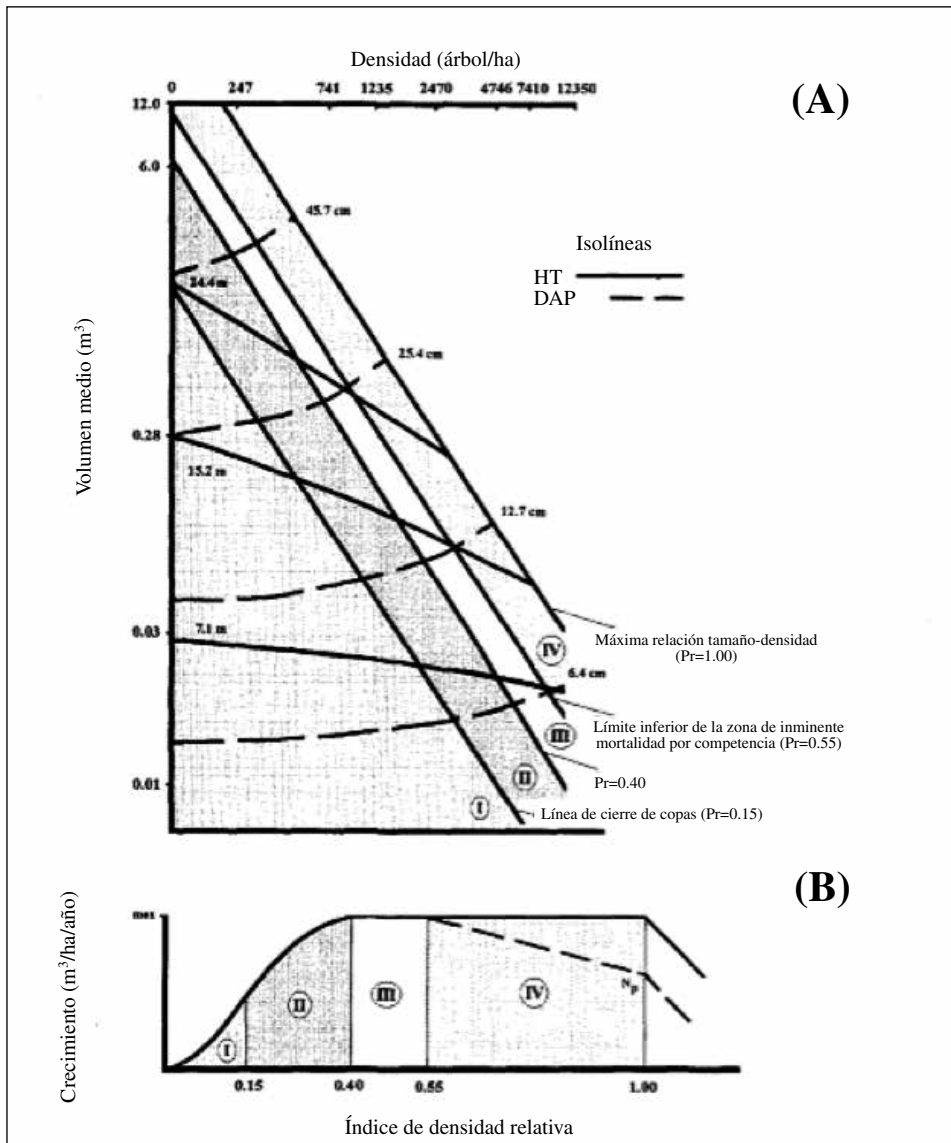
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Los diagramas de manejo de la densidad

Los diagramas de manejo de la densidad (DMD) son modelos de rodal que representan gráficamente las relaciones entre la densidad, la altura dominante, el diámetro medio cuadrático y el volumen medio para rodales coetáneos (Archibald & Bowling, 1995; Newton, 1997; Álvarez-González *et al.*, 2005). De acuerdo con Newton (1997), el manejo de la densidad es el proceso de control de la competencia para alcanzar los objetivos de manejo específicos. Los DMD permiten, entre otras cosas, determinar el espaciamiento inicial o determinar los esquemas de raleo necesarios para realizar varios objetivos: minimizar el tiempo para conseguir un rodal objetivo (Newton & Weetman, 1994), control de arbustos durante el establecimiento del rodal (Smith, 1989), optimizar el hábitat en su relación predador-presa (Sturtevant *et al.*, 1996), controlar la susceptibilidad del rodal al ataque de plagas (Whitehead *et al.*, 2001), reducir la susceptibilidad de daño por viento (Mitchell, 2000; Castedo *et al.*, 2009) o aumentar la diversidad del rodal (Powelson & Martin, 2001), entre otros.

Los DMD están basados en la ley del auto-raleo y la construcción de distintos niveles de densidad que permiten definir condiciones de crecimiento del rodal (Drew & Flewelling, 1979). Los DMD emplean relaciones funcionales empíricas que relacionan la densidad y el rendimiento, y reflejan el efecto acumulativo de varios procesos subyacentes de competencia en el proceso de crecimiento (Drew & Flewelling, 1979; Newton & Weetman, 1994). Los índices de densidad relativa, que se expresan como distintos niveles de ocupación en relación con un rodal de igual diámetro medio cuadrático en la línea de auto-raleo, en conjunto con la calidad del sitio, explican la dependencia temporal de estos procesos, y consecuentemente los DMD se pueden utilizar para predecir la trayectoria de la densidad de distintas opciones de manejo (Newton, 1997). Una expresión gráfica muy ilustrativa de un DMD se presenta en la Figura 2.1.

Figura 2.1. Diagrama de manejo de la densidad para pino oregón.



Fuente: Adaptado de Newton (1997).

En la Figura 2.1 se indican los componentes básicos. En (A): (I) zona bajo la línea de cierre de copas, (II) zona que cumple la condición tamaño-densidad en la que se alcanza la máxima producción del rodal, (III) zona bajo el límite inferior de inminente mortalidad por competencia, (IV) zona bajo la línea de máxima relación tamaño-densidad. Isolíneas de altura dominante y diámetro

medio cuadrático. En (B), ilustración de la teoría de Langstaer en relación con el diagrama de manejo de la densidad para las mismas zonas indicadas en (A): zona (I) el crecimiento por unidad de área es proporcional a la densidad (antes del cierre de copas), (II) el crecimiento por unidad de área es proporcional a la densidad pero el crecimiento individual declina, (III) zona donde el crecimiento por unidad de área no es proporcional a la densidad y (IV) zona donde el crecimiento por unidad de área es invariante a la densidad, sin embargo la producción neta declina con el aumento de la densidad.

Drew & Flewelling (1979), en su clásica publicación, plantean y discuten las bases conceptuales de los DMD y desarrollan un diagrama de manejo único para plantaciones de pino oregón para todos los sitios a base de modelos e información obtenida en Washington y Oregon, estos se validan con plantaciones en Kaingaroa State Forest de Nueva Zelanda y Blue Montains, Washington (Newton, 1997). Esta publicación es ampliamente referida por otros autores como una sólida contribución teórica al manejo de las plantaciones ([Kershaw & Fischer, 1991](#); [Dean & Baldwin 1993](#); [Zunino, 1995](#); [Newton, 1997](#); [Castedo et al., 2009](#); [Navarro et al., 2011](#)). Sin embargo Cameron (1988) cuestiona seriamente el modelo al evaluar las predicciones realizadas en 888 mediciones en 238 parcelas permanentes debido a sobreestimaciones del orden de 64% y 24% para el volumen y el diámetro medio, respectivamente, para densidades iniciales entre 300 y 3.000 árboles por hectárea, indicando que el modelo en su actual forma no debe ser utilizado (Cameron, 1988). Resulta bastante extraño que la contribución de Drew & Flewelling (1979) no sea posteriormente discutida, a la luz de esos resultados. La explicación de Cameron (1988) para la sobreestimación radica en la naturaleza estática que se deriva de las relaciones de sitio y volumen establecidas por Drew & Flewelling (1979) e indica que no refleja las relaciones dinámicas que se producen entre el sitio, el volumen, el diámetro y la densidad.

En Argentina, [Chauchard et al. \(1999\)](#) y [Chauchard et al. \(2001\)](#) desarrollaron un diagrama de manejo de la densidad para rodales mixtos de *Nothofagus*, los que no han sido validados. En Chile, [Gezan et al. \(2007\)](#) hicieron un trabajo similar para renovales de roble, raulí y coigüe entre las regiones de Biobío y de Los Lagos. Para ello utilizaron parcelas permanentes y temporales. Concluyen que los diagramas deben ser específicos. [Müller-Using et al. \(2013\)](#) hicieron lo suyo para roble en la Región del Biobío, basado en 20 parcelas temporales concluyendo que las tasas de mortalidad que encontraron son muy superiores respecto de los trabajos antes citados, ya

que se deben a sitios diferentes. Ninguno de estos modelos ha sido validado. Donoso *et al.* (2007) estudiaron la relación tamaño-densidad –uno de los componentes de los DMD– en bosques de canelo en la isla grande de Chiloé en función de factores fisiográficos, encontrando una significativa diferencia en la pendiente de la curva de mortalidad, siendo mayor que la ley del $-3/2$ y $-1,605$, aceptados como valores casi universales en la literatura. [Navarro *et al.* \(2011\)](#) construyeron para esa misma especie un DMD utilizando 300 unidades muestrales provenientes de la zona de Valdivia. Los resultados de las funciones que conforman el DMD presentan “aceptables capacidades predictivas, constatando la utilidad y precisión de esta herramienta para planificar intervenciones silviculturales” ([Navarro *et al.*, 2011](#)). Este modelo tampoco ha sido validado con muestras independientes. Se enfatiza en ese estudio los problemas que se derivan de raleos intensos que originan caídas de árboles por viento y se comparan con límites preestablecidos en el DMD. En el mundo se han construido muchos DMD, especialmente en coníferas ([Drew & Flewelling, 1979](#); [Smith, 1989](#); [Newton & Weetman 1994](#); [Zunino, 1995](#); [Valbuena *et al.*, 2008](#); [Castedo *et al.* 2009](#)) y también en latifoliadas ([Gingrich, 1967](#); [Roach, 1977](#)). Se destacan en la literatura los aportes de [Drew & Flewelling \(1979\)](#) en coníferas y [Gingrich \(1967\)](#) en latifoliadas.

2.2. Los componentes del diagrama de densidad

Línea de cierre de copas

Cuando los árboles crecen libres, desarrollan todo su potencial de crecimiento, al disponer de recursos sin limitación. [Krajicek & Brinkman \(1957\)](#) desarrollaron el siguiente concepto: si, dado un espacio ilimitado de crecimiento, los árboles de cierta especie y diámetro desarrollan copas de casi idéntico tamaño, ¿por qué entonces no utilizar la ocupación plena de esas copas como medida de densidad para los rodales? En ese mismo trabajo, [Krajicek & Brinkman \(1957\)](#) introducen el concepto de “factor de competencia de copas” (CCF) y lo definen como el porcentaje del espacio aéreo que ocupa un rodal cualquiera de una cierta especie y diámetro medio (*DAP*) en relación con un rodal teórico compuesto solo por árboles de la misma especie y diámetro medio que crecen libremente y que cubren por completo la misma área equivalente. En un trabajo posterior [Krajicek *et al.* \(1961\)](#) presentan formalmente la definición de “máxima área de copa” (MCA) de la siguiente forma:

$$MCA = \left(\frac{\pi}{4} * CW^2 \right) / A \quad (1)$$

Donde,

CW es el ancho de copa de un árbol creciendo libre de un cierto DAP .

A es la superficie de referencia donde se encuentra el árbol.

Esta relación se determina para cada especie y DAP y permite calcular la mínima cantidad de árboles que pueden poblar el área A , ocupando completamente esa superficie. En este mismo trabajo Krajiceck *et al.* (1961) determinaron que CW estaba linealmente correlacionado con el DAP , sin diferir mucho entre especies. Encontraron que las diferencias entre *red oak* y *withe oak* y entre *withe oak* y *hickory* no fueron significativamente diferentes por ello resumieron CW en una sola expresión para "latifoliadas". Las diferencias entre *norway spruce* y "latifoliadas" fueron altamente significativas (Krajiceck *et al.*, 1961).

Si:

$$CW = \alpha + \beta * DAP \quad (2)$$

donde α , β son coeficientes específicos, entonces,

$$MCA = (\pi / 4 * (\alpha + \beta * DAP)^2) / A = \delta_0 + \delta_1 * DAP + \delta_2 * DAP^2 \quad (3)$$

Conocido MCA se calcula CCF como:

$$CCF = (1 / A) * MCA = (1 / A) * (\delta_0 + \delta_1 * DAP + \delta_2 * DAP^2) \quad (4)$$

Para calcular el factor de competencia de copas de un rodal de diferentes clases diamétricas, el cómputo es:

$$CCF = (1 / A) * MCA = (1 / A) * (\delta_0 * \sum N_i + \delta_1 * \sum (DAP * N_i) + \delta_2 * (\sum DAP^2 * N_i)) \quad (5)$$

Donde:

N_i es el número de árboles que crecen en A , de la clase diamétrica i .

Este factor de competencia de copas permite evaluar el nivel de ocupación del espacio que un rodal en particular tiene dada la especie y su diámetro medio en relación con el rodal de máxima área de copa (MCA) respectivo

(Krajiceck *et al.*, 1961; Gingrich, 1967; Drew & Flewelling, 1979; Chauchard *et al.*, 2001; Husch *et al.*, 2003). Las estimaciones realizadas sobre la base de tablas de rendimiento normales en rodales de *oak-hickory* muestran valores de CCF superiores a rodales puros de *oak*, probablemente debido a la mayor tolerancia de *hickory* con cifras superiores a 200. De acuerdo con Schnur (1937), el CCF disminuye en rodales desde valores del orden de 300 a 180 entre la edad 10 y 100 años para rodales con índices de sitio 40 y presentan valores cercanos a 165 para índices de sitio 80 sin variar con la edad (Krajiceck *et al.*, 1961). Para *sitka spruce* y *western hemlock* los CCF disminuye en rodales desde valores del orden de 300 a 280 entre la edad 140 y 200 años para rodales con índices de sitio 60. Para índices de sitio 200 aumenta su valor desde 270 a 290 entre las edades 40 y 140 años (Krajiceck *et al.*, 1961). Sin duda, estos valores reflejan los cambios estructurales debido a la tolerancia de las especies.

La línea de cierre de copas de los DMD se construye utilizando la expresión *CW* ya señalada. Drew & Flewelling (1979) utilizaron una función lineal en pino oregón para relacionar el volumen del árbol medio como función de la densidad del rodal. El coeficiente de determinación fue de 0,82 para el rango de 1 a 7 pulgadas de *DAP*. Dean & Baldwin (1993) determinaron la línea de cierre de copas en un DMD para plantaciones de *loblolly pine* utilizando una relación lineal entre *CW* y *DAP* construida por Smith *et al.* (1992). Para *western hemlock* y *sitka spruce* la relación encontrada fue no lineal (Dean & Baldwin, 1993). En bosques de *Nothofagus*, Chauchard *et al.* (2001) muestran que en la construcción de DMD un modelo potencial tiene mejores ajustes que los modelos lineales para esa especie (Chauchard *et al.*, 2001). Los DMD contruidos para renoales de roble, raulí y coigüe presentados por Gezan *et al.* (2007) no tienen construida la línea de cierre de copas, sino que ha sido estimada basado en otros trabajos anteriores. Navarro *et al.* (2011) en un DMD para rodales de canelo en el sur de Chile tampoco construyeron la línea de cierre de copas, sino que la fijaron a base de los datos de Drew & Flewelling (1979). Valbuena *et al.* (2008) no construyen una línea de cierre de copas específica para un DMD en *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*, sino la definen como función de la línea de auto-raleo. Roach (1977), en la construcción de DMD para latifoliadas en el noroeste de Pennsylvania, tampoco construye la línea de cierre de copas, sino las estima empíricamente. Gingrich (1967), en su DMD utiliza la línea de cierre de copas establecida por Krajiceck *et al.* (1961). Kershaw & Fischer (1991) en la preparación de un DMD orientado a la obtención de madera aserrable en latifoliadas, tampoco construye la línea

de cierre de copas, sino las interpola de los datos de Gingrich (1967). Resulta entonces paradójico que en la mayoría de los DMD construidos, la línea de cierre de copas –uno de los componentes básicos del DMD– no haya sido construido sino estimado empíricamente o por supuestos. Para mayor comprensión ver la Figura 2.1.

Línea de auto-raleo o línea de máxima relación tamaño-densidad

En el otro extremo de un DMD, está la línea de auto-raleo o de máxima relación tamaño densidad donde ocurre que el crecimiento de un individuo en la población necesariamente debe ser a expensas de la mortalidad de otro individuo debido a la plena ocupación del espacio disponible (Yoda *et al.*, 1963; Drew & Flewelling, 1977; White, 1981; Weller, 1987; Zeide, 1987; Newton, 1997). El primer trabajo lo desarrolló empíricamente Reineke (1933), quien estableció el índice de densidad de rodal. Este relaciona el logaritmo del número de árboles con el logaritmo del diámetro medio mediante una relación lineal, y determinó que la pendiente de la recta donde el número de árboles máximo es de $-1,605$ para 12 de 14 especies analizadas en rodales monoespecíficos y coetáneos. Posteriormente, Yoda *et al.* (1963) derivaron analíticamente la relación, estableciendo la siguiente ecuación:

$$\ln B_s = K - 3/2 * \ln N \quad (6)$$

Donde,

B_s es la biomasa aérea promedio por unidad de superficie

N es la densidad de plantas que crecen en la unidad de superficie s .

Esta relación alométrica ha sido ampliamente estudiada en aplicaciones forestales, siendo particular e interesante en la construcción de DMD, ya que permite predecir la mortalidad que ocurrirá en rodales coetáneos debido al aumento de tamaño que se producirá en esa población por redistribución de recursos desde los individuos más débiles hacia los dominantes. Constituye una ley de la naturaleza y es conocida como la ley del $-3/2$. Una amplia revisión conceptual y bibliográfica de la ley del auto-raleo está contenida en Weller (1987).

La relación existente entre el índice de Reineke y la ley del auto-raleo es clara: se trata de dos aproximaciones del mismo fenómeno, uno teórico y otro empírico. El gran aporte de Reineke fue el de la construcción de una familia de curvas paralelas que reflejan los distintos niveles de ocupación de

los rodales considerando como referencia o curva guía de la población la que define la ocupación máxima, independientemente del sitio y la edad. Esta aproximación ha sido considerada en la construcción de los DMD, la que utiliza como referente la línea de máxima relación tamaño-densidad para definir las zonas intermedias de ocupación, cada una de ellas refleja distintos estados de ocupación, mortalidad y crecimiento (ver Figura 2.1 (A) y (B)).

El establecimiento de la constante $-3/2$ en los DMD es discutida por varios autores, quienes indican que esta varía con la tolerancia y la edad (Bravo *et al.*, 1997). Otros autores como Drew & Flewelling (1979) y Newton & Weetman (1994) utilizan directamente el valor de $-3/2$ como pendiente en el establecimiento de las familias de curvas del DMD. Algunos, en cambio, comparan la significación de las diferencias entre el valor empírico obtenido y $-3/2$ y cuando existe diferencias utilizan el valor estimado (Chauchard, 1999; Xue et al., 1999; Gezan et al., 2007; Kamara et al., 2012). Otros, no siendo significativamente diferentes, utilizan también los valores estimados (Zunino, 1995). También existen otros autores que lo construyen basándose en valores obtenidos de tablas de rendimiento empíricas (Gingrich, 1967).

Para determinar los parámetros del modelo existen varios procedimientos señalados por Zunino (1995):

- A mano alzada: Consiste en graficar los datos en el espacio logaritmo del tamaño vs. logaritmo de la densidad y aplicar una recta con pendiente $-3/2$ "a mano alzada" y fijarla inmediatamente por sobre toda la nube de puntos en el caso de parcelas temporales, o por sobre las trayectorias tamaño-densidad máximas en el caso de parcelas permanentes y leer directamente el valor de la intersección en el gráfico.
- Ajuste lineal: Consiste en preseleccionar de la nube de puntos, aquellos que se consideren han alcanzado la línea de auto-raleo y se realiza sobre ellos el ajuste lineal. En este caso puede o no fijarse la pendiente, dejando a criterio del analista la selección de puntos para el ajuste. Acá el mayor problema es la falta de objetividad de la selección de los datos. Weller (1987) considera este método demasiado subjetivo. Las limitaciones del método tienen que ver con la validez estadística y las limitaciones para inferencias confiables.
- Análisis de componentes principales. Para mayores detalles vea Newton (1997).

En los últimos años se ha utilizado función estocástica de frontera (Aigner et al., 1997; Zhang et al., 2005; Weiskittel et al., 2009). Este modelo permite inferencia estadística sin mayores complicaciones como las que ocurren al emplear otros métodos similares como por ejemplo regresión de cuantiles.

Línea de inminente mortalidad por competencia

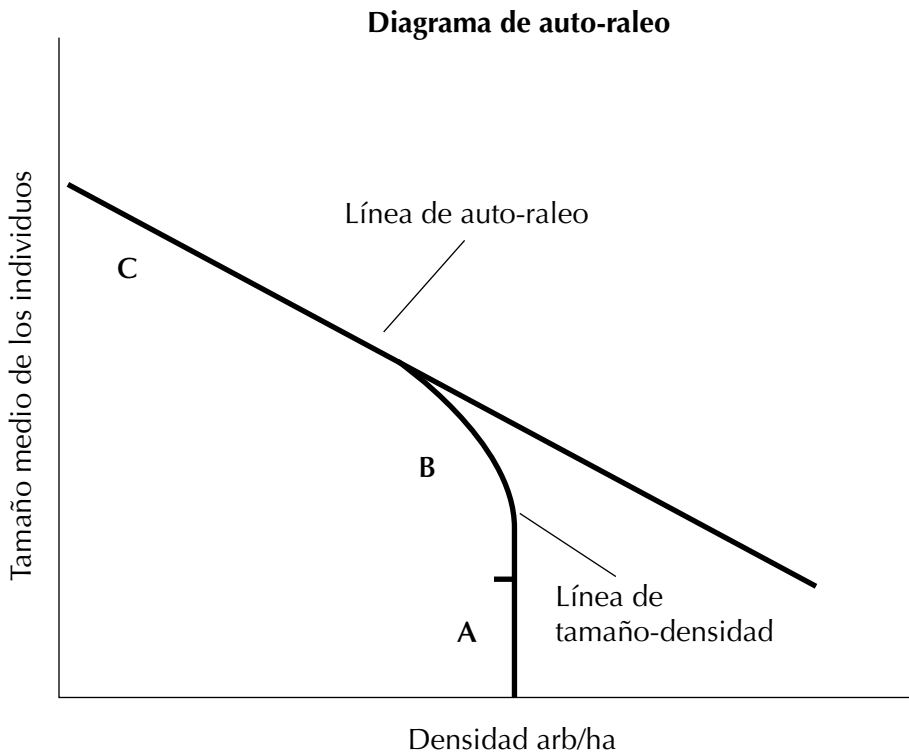
La mortalidad por competencia se desarrolla en forma creciente entre la línea de cierre de copas y la línea de auto-raleo (Zunino (1995); Drew & Flewelling (1979); Newton (1997)), como se ilustra en la Figura 2.2.

En el desarrollo inicial del rodal los árboles se ubican en la zona A, en que no existe competencia entre individuos, hasta llegar a la línea de cierre de copas en el límite de las zonas A y B (ver Figura 2.2). Luego de ello inician la competencia por recursos escasos en la zona B con una trayectoria que depende del sitio y la edad (Zunino (1995)), pero siempre con una tasa de mortalidad creciente, hasta ubicarse en la línea C o línea de auto-raleo, donde no existen recursos libres y el crecimiento se debe exclusivamente a la mortalidad de los individuos menores. Los DMD se construyen para mantener la densidad bajo esa zona. El problema es la intensidad y la periodicidad con que deben efectuarse los raleos para optimizar el manejo.

Si los raleos se efectúan inmediatamente por sobre la línea de cierre de copas, se extraerán pocos individuos de gran tamaño en el rodal, de baja calidad aserrable por el gran tamaño de ramas y nudos, y con alto riesgo de perder espacio de crecimiento. Si, por otro lado, se efectúa un raleo inmediatamente bajo la línea de auto-raleo se debe extraer mayor cantidad de individuos, de menor tamaño, de mejor forma fustal y con menor riesgo de pérdida de espacio de crecimiento. Este dilema –económico, biológico y técnico– necesariamente tiene una solución óptima en función de los objetivos de manejo. Los DMD construidos fijan la línea de inminente mortalidad por competencia en rangos muy parecidos entre sí, expresados como porcentaje de ocupación sobre la línea de auto-raleo. Drew & Flewelling (1979), fijan la línea de inminente mortalidad por competencia en 55%. Este valor se debe –por analogía– a un trabajo realizado en pino insigne, cuyo valor fue determinado en 54% (Drew & Flewelling, 1977), ubicando la línea en forma paralela a la línea de auto-raleo, de tal manera que las parcelas permanentes al trasponer esa cota registraron altas tasas de mortalidad. Drew & Flewelling (1979) señalan que a esa fecha no existía una suficiente base de datos para haber fijado el valor de la línea de inminente mortalidad por competencia, pero por comparación con otros trabajos señalan el haber fijado en 55% es adecuado. También indican estos autores que “...la mortalidad no puede ser predicha con precisión sobre la base del tamaño del árbol y la densidad del rodal, porque la densidad del rodal no es un agente causal de mortalidad. La mortalidad se debe a factores ambientales, patológicos o entomológicos, los que pueden impactar en los rodales con vigor en declinación. Un vigor

en declinación se puede caracterizar por una tasa de crecimiento de los árboles más bajo que el máximo. Esto comienza a ocurrir después del cierre de copas, acelerando a medida que el rodal se acerca a la máxima relación tamaño-densidad" (Drew & Flewelling, 1979). Estos mismos autores señalan que el rodal crece a una tasa máxima con densidades relativas entre 40% y 55%, la que puede ser más amplia.

Figura 2.2. Trayectoria de la línea tamaño-densidad.



Fuente: Copiado de Zunino (1995).

Los principios básicos que sustentan los DMD indicados por Drew & Flewelling (1979) para pino oregón son:

1. Los rodales que crecen bajo la línea de cierre de copas (15%) no utilizan completamente el sitio, y la densidad en esa zona puede aumentar sin bajar la tasa individual de crecimiento.
2. Se puede obtener el máximo tamaño de los árboles manejando la densidad del rodal cerca o bajo la línea de cierre de copas (15%).
3. Los rodales manejados cerca del límite inferior de la zona de inminente mortalidad por competencia y hasta una densidad relativa de 40% tendrán

un crecimiento total algo mayor, pero el tamaño de árboles será considerablemente menores que las plantaciones bajo esa densidad.

4. Los rodales no deberían entrar en la zona de inminente mortalidad por competencia (55 %) hasta varios años antes de la cosecha final, con el fin de evitar una severa reducción en el vigor y un daño potencial de los árboles.

Línea de tamaño máximo de ramas

El mayor problema en la utilización de la madera es la presencia de los nudos. Los nudos son ramas que constituyen parte de las piezas de madera final y pueden ser clasificados como nudos vivos, muertos o apretado (Pinto *et al.*, 2003; Souter *et al.*, 2003; Nagai *et al.*, 2009; Cown *et al.*, 2013) dependiendo si la rama que constituye parte de la pieza de madera estaba viva, muerta o ambas en la posición de corte de la pieza. Los árboles arquitecturalmente contienen el sistema foliar que conecta a las ramas. Mientras el follaje esté fotosintéticamente activo, la rama se mantendrá viva y, por consiguiente, su *cambium* tendrá continuidad con el del fuste. Cuando el sistema foliar de una rama deja de ser activo, la rama se muere en el árbol en pie, y por lo tanto dejará de tener un *cambium* activo, quedando inserta en el fuste como tejido muerto durante el proceso de crecimiento de este. Esta situación genera hacia el interior una rama cuyo tejido está completamente fusionado con la madera del fuste y hacia afuera una rama desconectada del fuste. Los árboles que crecen en su ambiente natural poseen en su gran mayoría poda natural, en la que la rama muerta es eliminada por acción de agentes externos (hongos, viento y roce mecánico). Después de ello, el árbol sigue su crecimiento expandiendo el tejido fustal sobre el pedúnculo de la rama muerta, generando lo que se conoce como oclusión de la rama. Esta oclusión genera un tejido de muy mala calidad inicialmente, ya que contiene madera con grano inclinado, corteza, resina o goma, el que después que cierra, genera una madera de óptima calidad que es conocida como libre de nudo. La magnitud de la oclusión está determinada por varios factores, siendo los más importantes el tamaño de la rama, la tasa de crecimiento del árbol en la sección del fuste donde se está realizando la oclusión y en menor medida la longitud y el ángulo de inserción de la rama (Corvalán, 1992; Corvalán & Hernández, 2007).

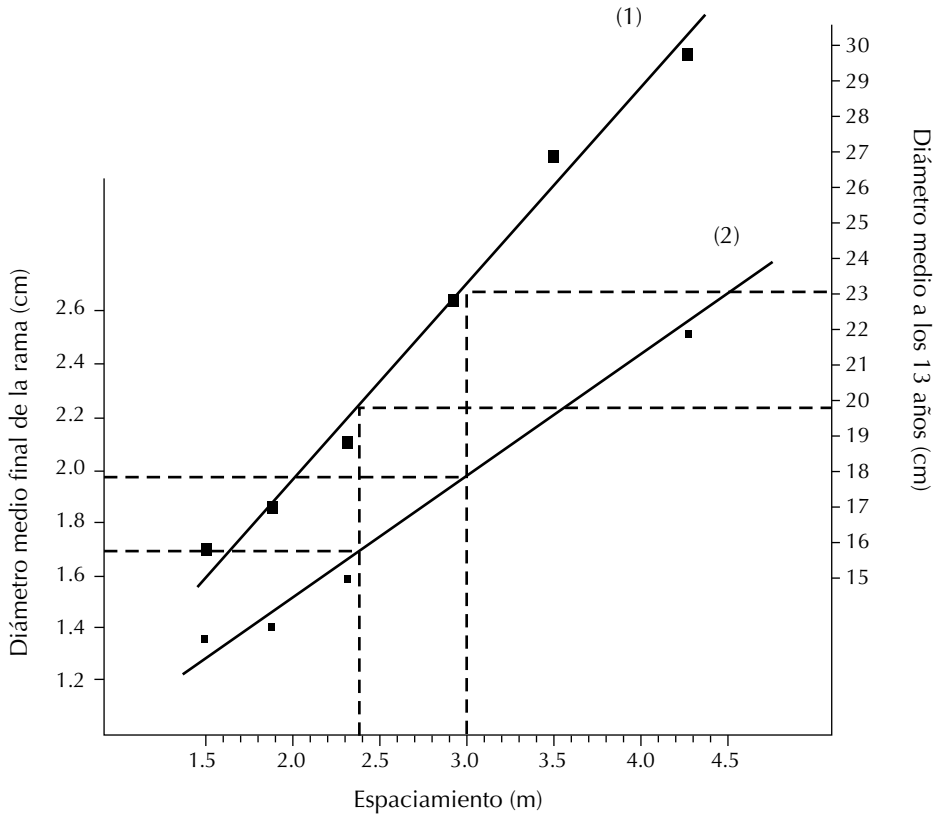
Con el crecimiento en altura, las copas desplazan su actividad hacia las ramas más jóvenes, dejando inactivas las ramas inferiores por falta de luz. Las ramas tienen una tasa de crecimiento que es proporcional a la tasa de

crecimiento diametral del fuste donde se insertan (Lewis & Ferguson, 1993; Kozłowski & Pallardy, 1997; Corvalán & Hernández, 2007), resultando entonces que las ramas son más pequeñas en la base del árbol, alcanzan su mayor tamaño en la sección intermedia de la altura y finalmente decrecen en la copa (Collin & Houllier, 1992; Lewis & Ferguson, 1993; Vestøl & Høibø, 2000; Garber & Maguire, 2005). Eso origina un proceso natural de aumento del tamaño del cilindro defectuoso central del árbol creciente en altura en las trozas basales (Lewis & Ferguson, 1993). Cuando se ralea un rodal aumenta la luminosidad hacia el piso, generando en las ramas vivas un aumento de tamaño. Sonderman (1985) realizó una interesante evaluación del efecto del raleo respecto de la calidad de la troza basal de un rodal mixto de 14 años de roble americano, raleados a intensidades de 30, 50 y 60% y remedidos seis años después. Los resultados muestran que los defectos asociados a las ramas fueron substancialmente superiores en los rodales con mayor intensidad de raleo que los rodales no raleados, ello concuerda con la creencia que la densidad afecta la calidad del fuste solo pocos años después del raleo (Sonderman, 1985). La Figura 2.3 ilustra el conflicto que genera el aumento simultáneo del espaciamiento, el *DAP* y el tamaño de ramas. Lavery (1986), citando a Pederich & Abbott, indica que ellos estudiaron el tamaño de ramas en pino insigne en un rodal con espaciamientos de plantación desde 1,5 x 1,5 m hasta 4,7 m x 4,7 m y evaluaron el tamaño de ramas a la edad de 13 años, en trozas basales donde todas ya estaban muertas (contenidas). La investigación muestra que un cambio en el espaciamiento inicial desde 2,4 m x 2,4 m (1.740 árb há⁻¹) a 3,0 m x 3,0 m (1.110 árb há⁻¹) puede aumentar el diámetro medio final de las ramas desde 1,67 cm a 1,98 cm y la proporción de ramas que excede 3,0 cm puede aumentar desde 12% a 19%. Un estudio semejante desarrollaron Neilsen & Gerrand (1999) con plantaciones de *Eucalyptus nitens* a diferentes densidades en Australia, donde el crecimiento de las ramas mayores aumenta rápidamente con la disminución de la densidad. Estos autores definen los regímenes de raleo en función del control del tamaño máximo de ramas.

Isolíneas de altura dominante y volumen

Los DMD –constituidos básicamente por la línea de cierre de copas, la línea de auto-raleo y la línea de inminente mortalidad por competencia– son usualmente complementados por isolíneas de altura dominante y volumen, construidos para fijar las condiciones de tamaño final del rodal al que se desea alcanzar y simular en el diagrama recursivamente diferentes estrategias de intensidad y frecuencia de raleo que se conectan con la situación inicial.

Figura 2.3. Relación entre el espaciamiento, el DAP y el tamaño de ramas.
 (1) DAP a la edad 13 años (2) Tamaño final de rama.

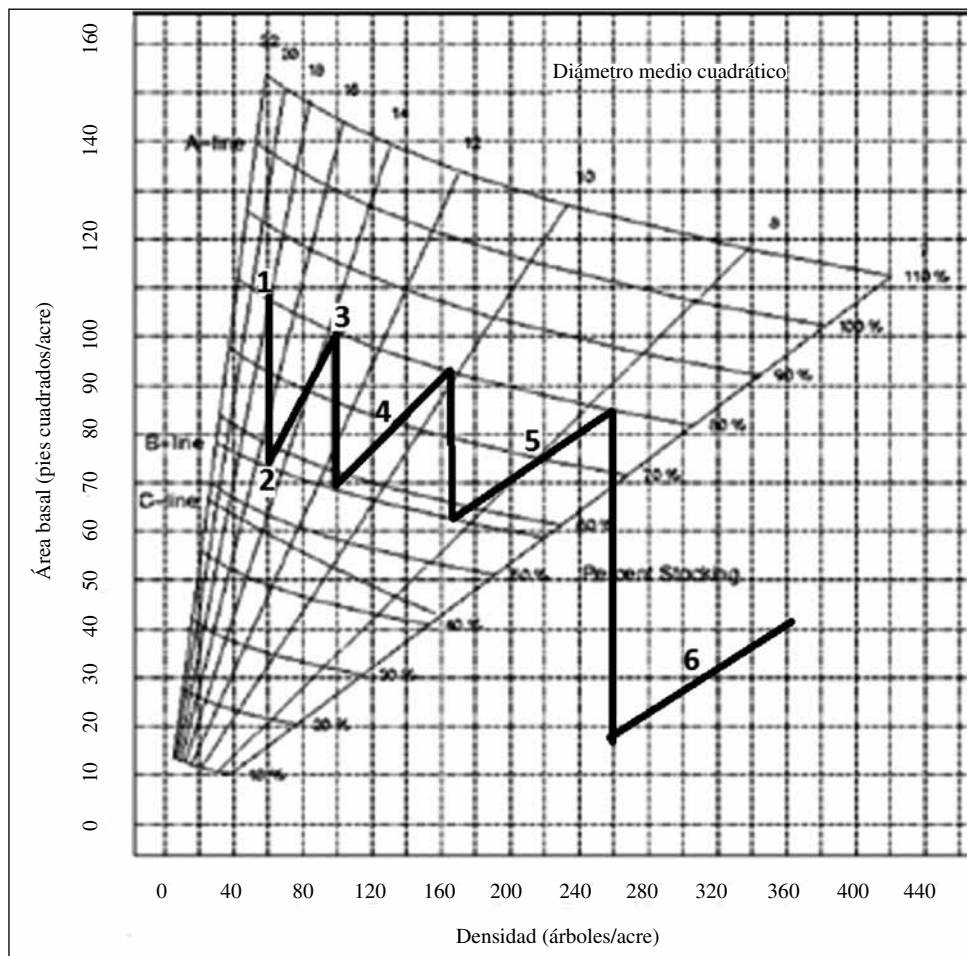


Fuente: Copiado de Lavery (1986).

Las isolíneas de altura dominante y volumen se construyen como relaciones funcionales que dependen del diámetro medio cuadrático y la densidad para permitir relacionarlo con las líneas de cierre de copas, de inminente mortalidad por competencia y de auto-raleo (Drew & Flewelling, 1979; Smith, 1989; Dean & Baldwin, 1993; Farnden, 1996; Newton, 1997; Valbuena *et al.*, 2008; Castedo *et al.*, 2009; Navarro *et al.*, 2011). Si se incorporan ecuaciones dinámicas de altura como son los índices de sitio como función de la edad será posible entonces incorporar en la estimación el tiempo que tomará alcanzar el tamaño final del rodal, a partir de la situación inicial. Si las ecuaciones se construyen solo con muestras temporales provenientes de rodales no manejados, entonces el desarrollo en altura dominante no permitirá la estimación de tiempo que tomará el control de la densidad para alcanzar el tamaño final.

De igual forma, los DMD siguen siendo modelos estáticos, ya que consideran que las predicciones del manejo seguirán el patrón de rodales no manejados. Esta es la gran limitación de los DMD, por lo que no deben ser considerados modelos de rendimiento ni se deben utilizar como predictores de crecimiento, ya que no lo son. Para ilustrar su uso se muestra la Figura 2.4.

Figura 2.4. Evaluación de una estrategia de raleo usando un DMD.



Fuente: Copiado de Long (2010).

Se comienza desde el final de la rotación y se desarrolla una estrategia de manejo hasta encontrar la situación inicial. En la Figura 2.4 el rodal meta fijado es un diámetro medio cuadrático de 18 pulgadas y 90 árboles por acre (1). Desde aquí se estima la densidad en línea recta hasta el punto (2) que representa la condición posterior a un raleo realizado en la situación (3) donde

se extrae área basal hasta la línea B o de cierre de copas. El paso desde (2) a (1) representa el incremento en área basal que tendrá el rodal considerando que no existirá mortalidad, ya que no se ha alcanzado la línea de inminente mortalidad por competencia. Este procedimiento es repetido recursivamente hasta encontrar la situación inicial.

Los supuestos son que, manejando la densidad bajo la línea de inminente mortalidad por competencia y sobre la línea de cierre de copas, no existirá mortalidad y los raleos permitirán aumentar el tamaño del rodal y concentrar el crecimiento hasta alcanzar la línea de mortalidad en donde se hará el raleo.

Las isolíneas de altura y volumen permiten precisamente fijar el tamaño final del rodal al que se quiere llegar, pero la variable que define el raleo es la relación tamaño-densidad. Los modelos más utilizados son los de tipo no lineal que relacionan:

$$V, H=f(D_c, N) \text{ Navarro et al. (2011)} \quad (7)$$

$$V=f(AB, N) \text{ Kershaw \& Fischer (1991)} \quad (8)$$

$$V=f(D_c, N, S) \text{ Dean \& Baldwin (1993)} \quad (9)$$

$$V, D_c=f(D_c, H, N) \text{ Valbuena et al. (2008)} \quad (10)$$

$$V=f(D_c, S) \text{ Drew \& Flewelling (1979)} \quad (11)$$

Donde,

V es el volumen por unidad de superficie.

H es la altura dominante.

AB es el área basal por unidad de superficie.

N es la densidad en árboles por unidad de superficie.

S es el índice de sitio.

D_c es el diámetro medio cuadrático.

3. HIPÓTESIS

En los rodales secundarios dominados por *Nothofagus obliqua* que crecen en la zona septentrional de Chile:

- El crecimiento volumétrico neto alcanza su valor máximo cuando se encuentran en densidades superiores a la línea de cierre de copas y bajo el límite inferior de la zona de inminente mortalidad por competencia.
- Las líneas de cierre de copas, de auto-raleo, de inminente mortalidad por competencia y de máximo tamaño de ramas puede ser determinada empíricamente como una relación lineal entre el diámetro medio cuadrático del rodal y su densidad.
- Existe una densidad del rodal donde es posible optimizar el crecimiento volumétrico neto sujeto al control del tamaño de ramas.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Construir un diagrama de manejo de la densidad para el control del tamaño de ramas en rodales septentrionales dominados por *Nothofagus obliqua* creciendo en Chile.

4.2. Objetivos específicos

- Construir la línea de cierre de copas.
- Construir la línea de auto-raleo o línea de máxima relación tamaño-densidad.
- Determinar la línea de inminente mortalidad por competencia.
- Construir la línea de máximo tamaño de ramas.
- Construir las isolíneas de altura dominante y volumen como parte del diagrama de manejo de la densidad.

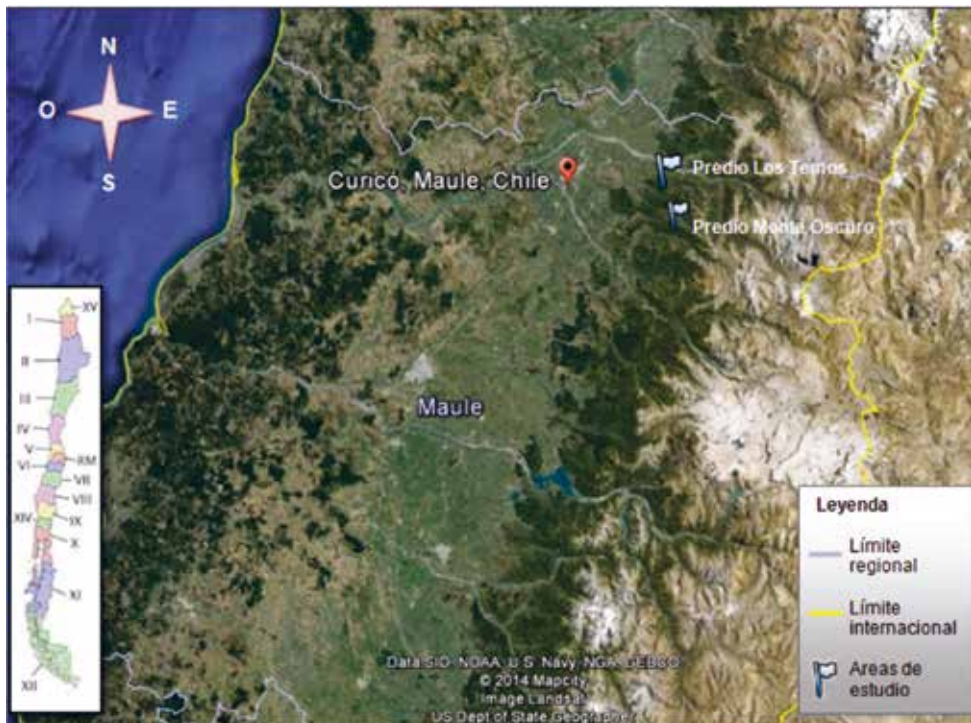
5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

Área de estudio

La información para la construcción del DMD se obtuvo de dos sectores de la Región del Maule ubicados en la provincia de Curicó, comuna de Romeral. El primero de ellos es el predio Los Temos, potrero Los Roces (coordenadas geográficas 19H 321461E-6122627S), ubicado a 33 km al Noroeste de Curicó. El segundo se encuentra en el sector precordillerano de Monte Oscuro (coordenadas geográficas 19H 324862E-6113124S), localizado a 50 km al Sureste de la ciudad de Curicó, cuyas ubicaciones se indican en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Ubicación geográfica del área de estudio.



Fuente: Google Earth (2014).

Antecedentes de la zona de estudio

En el predio Los Temos, potrero Los Roces, de aproximadamente 300 hectáreas, el bosque original fue rozado hace más de 60 años para habilitar el terreno a cultivo de trigo, convirtiéndose con posterioridad en un predio de exclusivo uso ganadero. Por esta razón solo es posible encontrar individuos de *Nothofagus obliqua* de grandes dimensiones, muchos de ellos creciendo de manera aislada, libres de competencia. Estos son originados por monte alto (semilla) y monte bajo (rebrote), y presentan variadas condiciones sanitarias. Solo unos pocos presentan signos de intervenciones recientes.

En Monte Oscuro el área de estudio se aproxima a 1.300 hectáreas y corresponde a formaciones de bosques secundarios de los tipos forestales roble-hualo, ciprés de la cordillera y roble-raulí-coigüe. Este predio fue talado para extraer madera aserrada en la década de 1950, donde aún se encuentran tocones de esa época. Posteriormente el bosque fue talado en bosquetes para producción de carbón. De ahí su formación como mosaico de bosquetes coetáneos secundarios.

Características del suelo

En relación con el suelo del área de estudio, en ambos sectores los inceptisoles o trumaos son característicos. Desde un punto de vista morfológico, la formación de la precordillera es producto de materiales de depósitos de morrenas, acarreos fluviales y glaciofluviales, además de algunos depósitos lacustres y glaciolacustres que han sido cubiertos por capas de cenizas (CONAF, 1999). Consecuentemente, el suelo es derivado de cenizas volcánicas y presenta una textura franco-limosa, alto contenido orgánico y baja disponibilidad de fósforo y nitrógeno (CONAF, 1999). En términos generales, la Región del Maule posee suelos con alto grado de erosión. En particular, los ubicados en el sector de Romeral están clasificados en los rangos de erosión "severa" y "muy severa" (CIREN, 2010).

Vegetación

El tipo forestal dominante en la zona de estudio es el de roble-hualo, limitado en su distribución por el norte por los cerros El Roble y La Campana (regiones Metropolitana y de Valparaíso, respectivamente) y al sur con la ribera norte de los ríos Ñuble e Itata. Es posible identificarlo en ambas cordilleras dentro de los límites del clima mediterráneo, usualmente sobre los 1.000 msnm. Es común encontrarlo limitando o mezclado con el tipo forestal ciprés de la cordillera y tipo forestal esclerófilo (Donoso, 1995).

La principal amenaza de este tipo forestal es la sustitución por especies comerciales como *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* en las zonas cordilleranas, junto al floreo y la ganadería (Donoso, 2007).

El subtipo forestal que corresponde a la zona de estudio es el de bosques andinos de roble de altura, donde es posible encontrar la especie creciendo junto a *Peumus boldus* y *Cryptocarya alba*, propias del bosque esclerófilo, así como con *Laurelia sempervirens*, *Aextoxicon punctatum*, *Nothofagus glauca* y *Astrocedrus chilensis*, entre otras, dependiendo de la exposición en la que se encuentre (Corvalán et al., 2014).

La importancia del tipo forestal radica en que este es el único *Nothofagus* que crece en clima mediterráneo, presentando gran cantidad de endemismos en flora y fauna. Además, como todo bosque, cumple un rol ecológico en la regulación de las cuencas hidrológicas que proveen agua para la región, donde suele ser escasa, especialmente, durante la estación seca (Donoso, 2007).

Clima

En la región se identifica el tipo climático que corresponde al clima templado cálido con estación seca de cuatro a cinco meses. A grandes rasgos, este se caracteriza por concentrar las precipitaciones durante los meses de invierno, mientras que en los meses de la estación seca (octubre a marzo) las precipitaciones estivales no superan los 40 mm mensuales. La zona precordillerana presenta nevazones ocasionales en invierno (Dirección Meteorológica de Chile, 2014). Las temperaturas medias se resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 5.1. Resumen de temperaturas medias mensuales en la estación General Freire, Curicó.

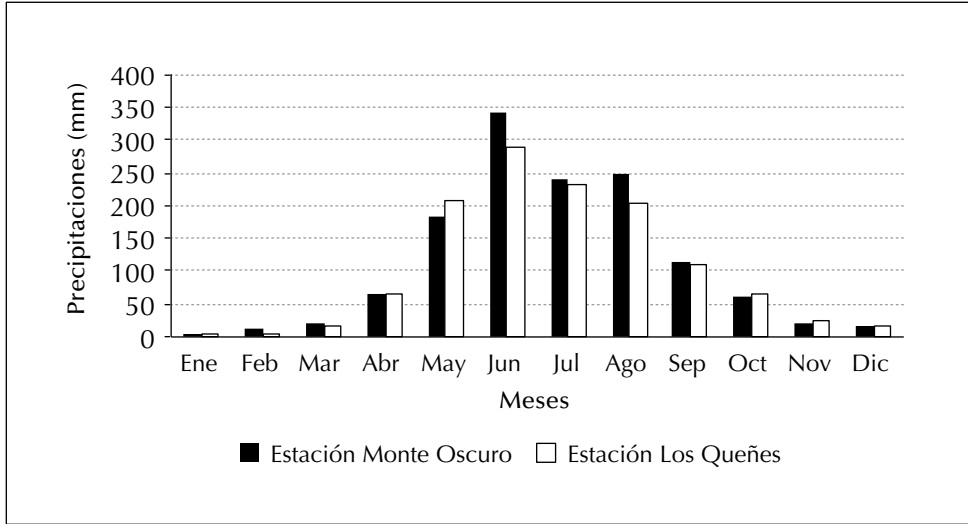
Temperatura (°C)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
T. Media	19,9	18,9	15,9	12,1	9,5	7,4	7,2	8,2	10,1	13,0	15,9	18,7	13,1
T. Mínima	10,8	10,0	8,0	5,5	4,9	3,8	3,4	3,8	4,5	6,5	8,2	10,1	6,6
T. Máxima	29,5	28,8	25,7	20,8	15,8	12,4	12,3	14,2	17,1	20,6	24,2	27,7	20,8

Fuente: Atmósfera (2014).

Al observar los datos de precipitaciones, que se muestran en la Figura 5.2, las estaciones meteorológicas de Monte Oscuro y Los Queñes (las más cercanas al predio Monte Oscuro y Los Temos, respectivamente) muestran que la mayor concentración de precipitaciones se registra entre los meses de abril a octubre, logrando 94% del agua caída. Asimismo, como se indica en la Figura 5.3, se aprecia también una tendencia a la baja en el total de

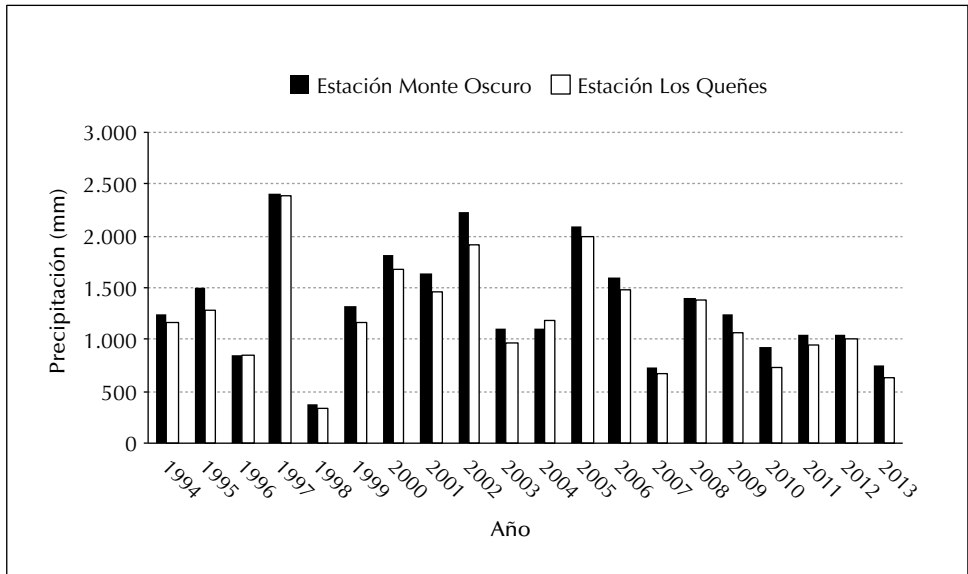
precipitaciones anuales, especialmente en los últimos seis años, como se muestra en las siguientes gráficas:

Figura 5.2. Tendencia de las precipitaciones mensuales en Monte Oscuro y Los Queñes.



Fuente: DGA (2014).

Figura 5.3. Tendencia de las precipitaciones anuales en Monte Oscuro y Los Queñes.



Fuente: DGA (2014).

Fuentes adicionales de información

- Capas de sistema de información geográfica (SIG)

Para el sector de Monte Oscuro se dispone de un conjunto de datos LiDAR con una densidad de 4,64 puntos por m^2 (p/m^2) y una imagen aérea VIS con una resolución espacial de 1 m, los que fueron adquiridos y ortorrectificados en marzo del 2011. A partir de esta información se dispone de un detallado modelo de elevación digital de terreno y de copas que permite la medición del modelo de alturas con muy alta resolución espacial (1 m). También existen en la zona fotografías aéreas métricas del Servicio Aerofotogramétrico de Chile de 1980 y 1995-1996, escalas 1:50.000 y 1:20.000, respectivamente, y fotos color de 1991, escala 1:5.000 no métricas. La Universidad de Chile también dispone de dos intensivos inventarios forestales realizados entre 2011 y 2013. Para el predio Los Temos se dispuso de fotografías aéreas métricas del Servicio Aerofotogramétrico de Chile de 1980 escala 1:50.000 e imágenes Google Earth actuales.

- Descripción metodológica de los inventarios 2011 y 2013

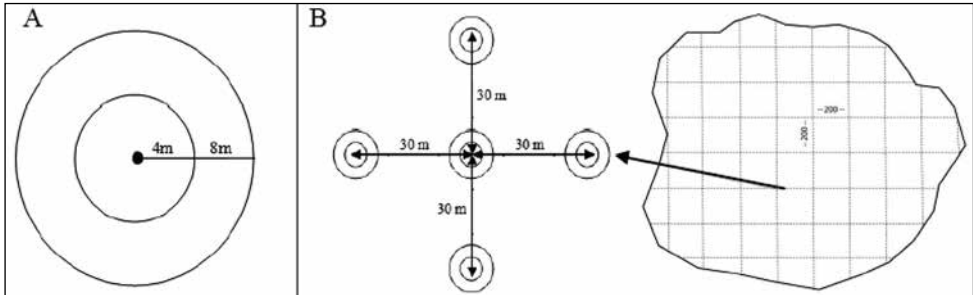
En el inventario del 2011 en el predio Monte Oscuro fueron medidas 985 parcelas concéntricas agrupadas en *clusters* de cinco parcelas cada uno. Se definió una parcela central y desde su centro se ubicaron cuatro parcelas satélites, cuyos centros estuvieron separados a 30 metros y en dirección a cada uno de los puntos cardinales (N, S, E y O). El centro de cada unidad central de cada conglomerado se ubica en las intersecciones de las líneas horizontales (E-O) y verticales (N-S), separadas cada 200 metros de la grilla dispuesta sobre los rodales seleccionados. Los radios de los círculos concéntricos son cuatro y ocho metros, que contienen árboles con *DAP* entre 10-20 cm y mayor o igual que 20 cm, respectivamente, como se muestra en la Figura 5.4.

En cada parcela se registraron las coordenadas geográficas y se midieron todos los árboles con *DAP* mayor o igual a 10 cm, la altura total de cada uno, la especie, el origen (monte alto o monte bajo), observaciones sanitarias y del entorno y el radio en el que se encontró cada individuo. Adicionalmente se inspeccionaron las características del sotobosque (tipo, densidad, altura, especies dominantes, etc.). La distribución espacial de los conglomerados se señala en la Figura 5.5.

En el inventario del 2013 fueron medidas 151 parcelas concéntricas agrupadas en *clusters* de tres parcelas, ubicadas a 40 m de distancia (de centro a centro) entre cada una formando un triángulo equilátero. La distribución de las parcelas fue igualmente sistemática con una grilla de las mismas

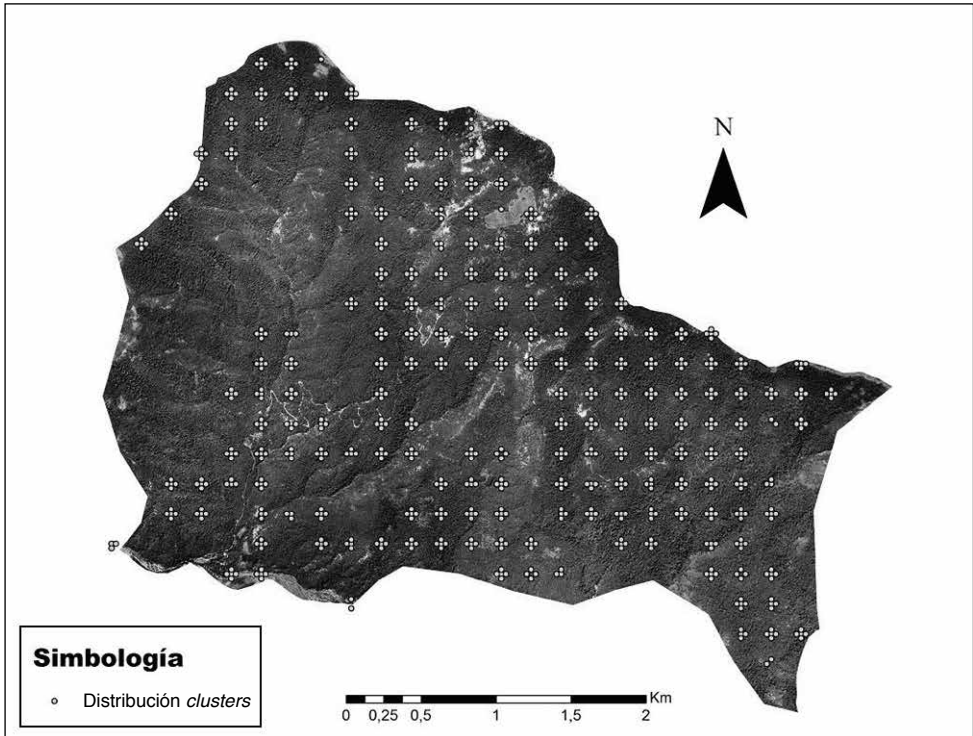
Figura 5.4. Diseño inventario 2011.

En A, diseño de la parcela concéntrica.
En B, diseño de las unidades muestrales en grilla de 200 m.



Fuente: [Corvalán et al. \(2014\)](#).

Figura 5.5. Distribución de *clusters* en Monte Oscuro, inventario 2011.



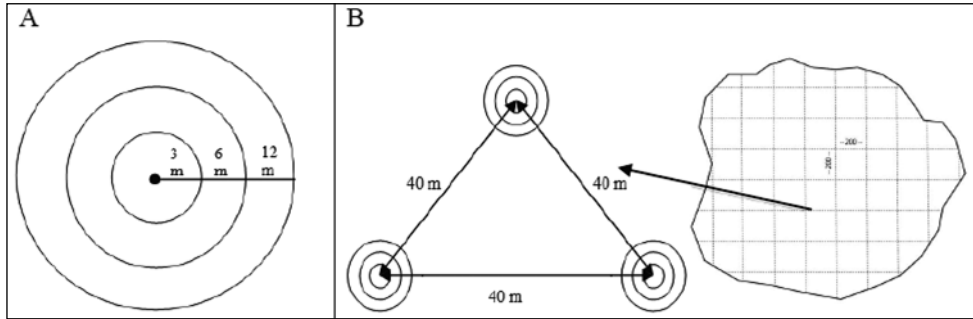
Fuente: [Corvalán et al. \(2014\)](#).

características que la anterior. Los radios de los círculos concéntricos son 3, 6 y 12 metros, con árboles de *DAP* mayor o igual a 10, 15 y 20 cm,

respectivamente, como se muestra en la Figura 5.6 y su ubicación espacial en la Figura 5.7.

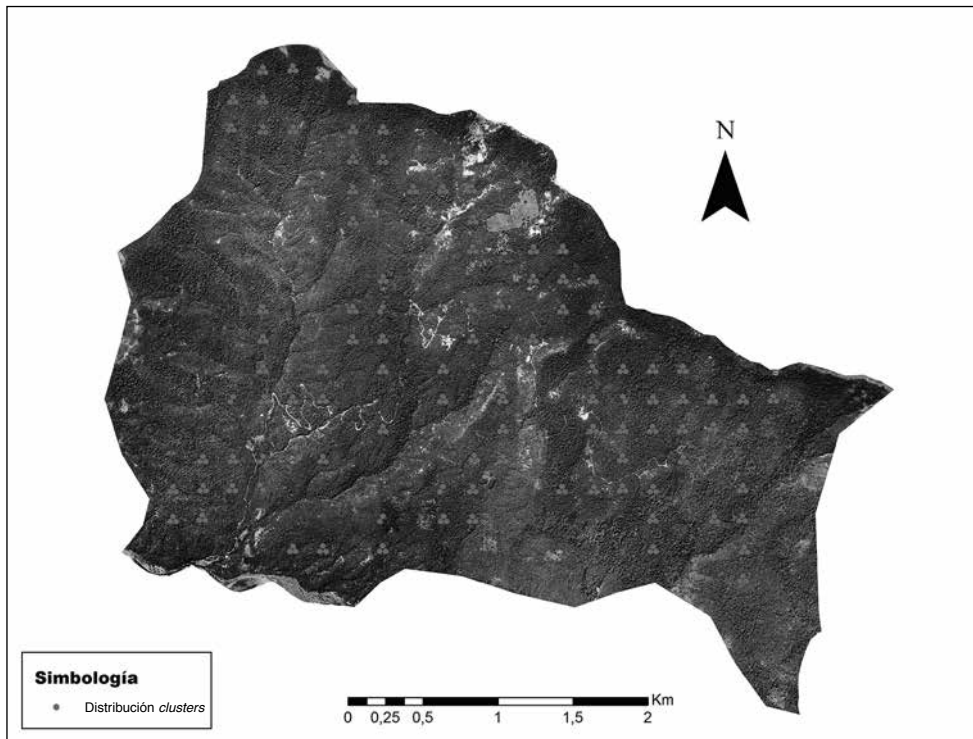
Figura 5.6. Diseño inventario 2013.

En A, diseño de la parcela concéntrica.
En B, diseño de las unidades muestrales en grilla de 200 m.



Fuente propia.

Figura 5.7. Distribución de *clusters* en Monte Oscuro, inventario 2013.



Fuente propia.

Estos inventarios fueron utilizados como fuente de datos complementarios a los tomados en terreno para la determinación de línea de auto-raleo. Es admisible destacar que en ambos solo se utilizaron las parcelas cuyos datos cumplieran con los criterios de selección aplicados a las parcelas de esta línea, es decir, solo se utilizaron las parcelas con más de 100 árboles por hectárea, con una pendiente inferior a 45%, con una composición mínima de 60% de roble y árboles con *DAP* mayor a 10 cm.

- Instrumentos de medición

Para localizar los puntos de muestreo se utilizó un GPS Garmin modelo GPSmap 62s. Las mediciones de diámetro fueron hechas con forcípula Haglof o huincha métrica en el caso de diámetros muy grandes. La altura fue estimada con un clinómetro Suunto y huincha de distancia.

Adicionalmente se hizo uso del sistema de información geográfico ArcGIS y Google Earth para las actividades iniciales del muestreo, procesamiento y obtención de imágenes.

- Procesamiento de la información

Para el procesamiento de datos se utilizó el *software* Microsoft Office Excel 2007 y Project R.

5.2. Método

El DMD que se propone está constituido por las líneas de cierre de copa, de auto-raleo, de control del tamaño máximo de rama, de isolíneas de altura dominante y de volumen y de inminente mortalidad por competencia. Para su construcción se utilizó tanto muestras dasométricas como dendrométricas, las que se describen a continuación.

Línea de cierre de copas

La preselección de los puntos de muestreo en el predio Los Temos fue hecha mediante la identificación de árboles solitarios sin individuos cercanos que le pudieran haber generado competencia. Para ello se utilizaron las imágenes que provee Google Earth del 2007, 2010, 2011 y 2013. De esta manera se asegura que los ejemplares medidos no han visto reducido su potencial de crecimiento producto de la competencia en al menos ocho años.

En el caso de Monte Oscuro, la preselección de árboles solitarios se llevó a cabo por medio de la observación y comparación de las fotografías aéreas disponibles, las imágenes que provee Google Earth y la imagen satelital VIS. Se eliminaron de la selección los sectores incendiados o que han sido intervenidos en los últimos 20 años.

Con estos antecedentes, las coordenadas de los puntos seleccionados se registraron en un GPS para su posterior localización en terreno.

Los árboles seleccionados para la construcción de esta línea cumplieron con las siguientes condiciones indicadas por Krajicek *et al.* (1961):

- Copas libres de competencia en todos sus lados.
- Ramas extendidas desde la base del árbol hacia el ápice. Ramas inferiores más largas o, al menos, tan largas como las que le siguen hacia arriba.
- Fuste libre de bifurcaciones hasta los cinco metros de altura.
- Árboles sin evidencia de poda, cortes de corteza, daños por vientos y ataques de plagas.

En estos árboles se midieron el *DAP*, la altura total y ocho proyecciones de la copa, una cada 45° de dirección cardinal, considerando la tendencia local de la copa para su medición. El *DAP* se midió con forcípula en el eje mayor y menor y se calculó su promedio geométrico con precisión de 1 cm. La altura se determinó con precisión de 1 m utilizando clinómetro y huincha de distancia. Los radios de copa r_i desde la posición del fuste a los 8 radios se realizaron proyectando visualmente la copa al suelo y se midieron con huincha de distancia y precisión de 1 decímetro, para el cálculo del área y diámetro medio geométrico. El diámetro de copa fue calculada como:

$$DC = 2 * \sqrt{\left(\sum_{i=1}^8 r_i^2\right) / 8} \quad (12)$$

Los modelos de ajuste de la línea de cierre de copas fueron los siguientes:

$DC = \alpha + \beta * DAP$	Krajicek <i>et al.</i> (1961); Ek (1974); Foli <i>et al.</i> (2003)	(13)
$DC = \alpha + \beta * DAP^2$	Foli <i>et al.</i> (2003)	(14)
$DC = \alpha + \beta * \ln DAP$	Foli <i>et al.</i> (2003)	(15)
$DC = \alpha + \beta * DAP + \gamma * DAP^2$	Foli <i>et al.</i> (2003)	(16)
$DC = \alpha + \beta * DAP^\gamma$	Ek (1974); Smith <i>et al.</i> (1992)	(17)
$DC = \alpha * DAP^\beta$	Russell & Weiskittel (2011); Chauchard <i>et al.</i> (2001)	(18)

Se agregó la ecuación (19) del tipo paraboloide hiperbólico cuya forma general describe adecuadamente la relación D_c vs DAP :

$$DC = DAP^{(1/\alpha)} \quad \text{Corvalán, en este estudio.} \quad (19)$$

Donde,

DC es el diámetro de copa (m)

DAP es el diámetro a la altura de pecho (cm)

Para cada modelo se calcularon estadísticos de validación para evaluar las capacidades predictivas de los modelos, siguiendo la nomenclatura y observaciones de Salas *et al.* (2010). Los estadísticos se detallan a continuación:

(a) Diferencia agregada (AD) o residual medio, calculada mediante

$$AD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

Donde,

$$r_i = DC_i - \hat{DC}_i$$

DC_i es el valor observado del diámetro de copa para el i -ésimo árbol.

\hat{DC}_i es el valor ajustado del diámetro de copa para el i -ésimo árbol.

n es el tamaño muestral.

(b) Raíz cuadrada de las diferencias (RMSD), calculada mediante

$$RMSD = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2\right)}$$

(c) Suma absoluta de las diferencias (AAD),

$$AAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|$$

Debido al reducido tamaño muestral, se ajustaron y validaron los modelos empleando las mismas observaciones (i.e., autovalidación).

Para comparar los modelos en mayor detalle, y debido al uso posterior en la construcción de la línea de cierre de copas (LCC), se calculó los estadísticos de ajuste tanto del diámetro de copa estimado (\hat{DC}) como el área de copa (\hat{Ac})

para cada árbol mediante la fórmula del área de un círculo con diámetro igual al diámetro de copa medido.

Una estadística descriptiva de los datos se muestra a continuación:

	DAP	DC
Mínimo	1,5	0,9
Máximo	140,0	24,2
Media	54,0	11,6
Desviación estándar	40,6	6,3
Tamaño muestral	102,0	102,0
Coficiente de variación	75,2	54,6

Línea de auto-raleo

En la construcción del diagrama de densidad en roble es clave definir el límite superior (100%) de ocupación del espacio de crecimiento o determinación de la línea de auto-raleo.

En una primera instancia, y habiendo seleccionado en terreno subjetivamente 30 parcelas y teniendo en consideración que ellas cumplieran con los siguientes requisitos: estar en una pendiente inferior a 45%, tener al menos 100 árboles por hectárea, tener una cobertura de dosel completa, tener al menos 60% de individuos de roble, tener una apariencia de estructura homogénea (coetánea), tener una superficie cuya forma (variable) y tamaño fueran de al menos 200m², cubrir diferentes diámetros medios cuadráticos y presentar mortalidad, ocurrió que al plotear los datos en escala $\ln N$ vs. $\ln D_c$ junto con los de los inventarios forestales intensivos, esta nube de puntos (del auto-raleo) quedó con muchas parcelas bajo los valores de parcelas de inventario, lo que confirma lo señalado por Weiskittel *et al.* (2009) y de Russell & Weiskittel (2011) en relación con que resulta mejor utilizar una muestra de gran tamaño y ajustar el modelo en la frontera de los datos, por un tema de objetividad.

Por esta razón se decidió establecer la línea de máxima densidad a base de un ajuste realizado mediante regresión estocástica de frontera.

Se ajustó el modelo de Reineke (Reineke, 1933), que tiene la forma:

$$\ln N = \beta_0 + \beta_1 \ln D_c \quad (20)$$

Los datos utilizados en el presente reporte provienen de los inventarios forestales intensivos realizados en 2011 y 2013.

Los datos tienen 516 observaciones y las variables son como sigue:

- Número de árboles por hectárea (N) medido en árb/ha⁻¹ y representado en la base de datos por Nha .
- Área basal (AB) medido en m²/ha⁻¹ y representado en la base de datos por AB .
- Diámetro del árbol de área basal media (D_c) medido en cm y representado en la base de datos por D_c .

Una estadística descriptiva de los datos se muestra a continuación:

	Nha	D_c
Mínimo	154,7	10,8
Máximo	3.271,5	47,0
Media	1.022,7	20,9
Desviación estándar	567,9	6,7
Tamaño muestral	516,0	516,0
Coefficiente de variación	55,5	32,0

Para determinar la línea máxima de densidad, o la conocida línea de autoraleo, se empleó el modelo de función estocástica de frontera (Aigner *et al.*, 1997) o SFR. Dicho modelo estadístico ha sido representado de diversas formas en la literatura (e.g., Aigner *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2005; Weiskittel *et al.*, 2009). Se expresa matricialmente debido a su simplicidad y generalidad tal como sigue,

$$Y = X\beta + (V - U) \quad (21)$$

Donde el vector Y es el set de observaciones de $\ln N/ha_i$; la matriz X es la matriz de diseño conteniendo al set de observaciones con la variable predictora $\ln D_{ci}$; el vector V es una variable aleatoria parte del error del modelo, donde $V_i \sim N(0, \sigma_v^2)$; el vector U es una variable aleatoria positiva representando la otra parte del error del modelo, y siendo una variable que se distribuye "mitad-gaussiana" donde $U_i \sim N(0, \sigma_u^2)$. Este último término del modelo representa una desviación sistemática desde la frontera. U_i representa la diferencia en la densidad del rodal en cualquier punto y la máxima densidad estimada. Con esto se elimina la necesidad subjetiva de construir set de datos que están cerca de la frontera o bien modificar el intercepto del ajuste tradicional del modelo de Reineke. Se usó SFR, porque tal como lo destaca Zhang *et al.* (2005), este modelo permite inferencia estadística sin mayores

complicaciones como las que ocurren al emplear otros métodos similares como por ejemplo regresión de cuantiles. El modelo (20) se ajustó mediante el método de máxima verosimilitud implementado para modelos de SFR en el paquete SFA (Straub & Hothorn 2014) del *software* R Development Core Team (2014). Se evaluó el uso de una distribución truncada para el componente U_i del modelo SFR, sin embargo, no mostró diferencias significativas al asumirlo *half-normal*.

Línea de control del tamaño de ramas

Se usó como material experimental renovales de roble existentes en el predio Monte Oscuro. Estas parcelas fueron clasificadas según las distintas combinaciones de rangos de densidad relativa y altura dominante para abarcar la mayor diversidad posible de situaciones estructurales. Para la determinación de densidad relativa se usó inicialmente el modelo propuesto por Gezan *et al.* (2007). Los rangos de densidad relativa utilizados para la selección de rodales fueron 0-15%; 15-40%; 40-55% y 55-100%, mientras que los de altura dominante fueron 5-10 m, 10-20 m y mayores a 20 m. Con estos antecedentes se localizaron en terreno 30 parcelas de forma y tamaño variable y 71 parcelas de radio fijo de 200 m², estas fueron utilizadas para la construcción de un DMD. De esas parcelas se seleccionaron 60 en las que se eligió el árbol central del cuartil superior de *DAP* para la medición de ramas y forma fustal.

A cada árbol seleccionado se midió en pie el *DAP* geométrico (*DAP*) con forcípula (cm) y la altura total (*H*) (m) con clinómetro y huincha de distancia (m, cm). Luego se volteó y midió la longitud de fuste libre de ramas, la longitud de fuste con ramas muertas y la longitud de la copa viva (m, cm) en su eje principal. La longitud total del fuste se dividió en décimos de altura en los que se seleccionó y midió el diámetro de la rama de mayor tamaño (mm) con pie de metro, en dirección perpendicular a la rama a 1 cm de distancia del fuste, su vitalidad (viva o muerta) y su ángulo de inserción en grados sexagesimales con transportador respecto del eje del fuste en su ángulo superior. Para estimar los diámetros geométricos fustales tanto en la posición de las primeras ramas muertas como vivas (*Dfm*, *Dfv*) y su altura sobre el suelo (*Hrm*, *Hrv*) se midió los diámetros fustales aproximadamente cada un metro en su eje mayor y menor con corteza a partir del tocón hasta el ápice evitando realizar mediciones en la vecindad de la inserción de las ramas. Se midió el diámetro de la rama mayor de todos los deciles (*Drmax*) y su altura de inserción en el fuste (*hrmax*), así como el diámetro de las primeras ramas muertas y vivas

continuas de cada árbol (Drm , Drv) y el ángulo de inserción de las primeras ramas muertas y vivas (Arm , Arv). Para una submuestra de 12 árboles al azar se realizó un análisis de tallo complementario para fechar la edad de formación de las ramas inferiores y determinar el tiempo máximo aproximado en que permanecen muertas en pie.

Debido al alto costo de medición de la técnica de disección, la dificultad de lectura de anillos de las ramas que se ha reportado en algunos trabajos (Maguire & Hann, 1987) y por tratarse de un estudio preliminar, en este trabajo se usó un estimador de diámetro máximo usando el siguiente modelo:

$$Dr \max_i = \alpha X_i + \beta X_i^2 + \delta X_i^3, \text{ sujeto a } \alpha = -\beta - \delta \quad (22)$$

Donde,

$Dr \max_i$ es el diámetro de la rama mayor del decil i .

X_i es la altura relativa a la que se encuentra la rama mayor del decil i : $0 \leq X_i \leq 1$.

α , β , δ son coeficientes del modelo.

La restricción se impuso para garantizar que en el árbol, tanto a nivel de suelo como al ápice, el tamaño de la rama máxima estimada sea cero (0). Los coeficientes del modelo se determinaron usando la rutina SOLVER de Excel, minimizando la suma de residuos cuadráticos. Este método supone que la predicción del diámetro máximo de las ramas basales mediante un modelo estático del perfil vertical de las ramas de mayor tamaño en el árbol es insesgado y se plantea como sustituto a la medición dinámica directa de las mismas con el método de disección de ramas. Las ramas muertas en pie en la sección basal del árbol y la restricción de diámetro de rama cero para la posición de altura cero en el árbol que es impuesto al modelo permiten asumir una buena interpolación de los diámetros de rama máximos en esa sección del árbol. La principal limitación de esta propuesta metodológica es que asume que la medición de una sola rama por decil de altura permite modelar bien la estructura de ramas gruesas para todo el fuste. Mayor cantidad de mediciones o el uso de métodos de disección para medir el verdadero tamaño de las ramas, sin embargo resultan ineficientes para una evaluación preliminar como es la realizada en este trabajo.

Para estimar las alturas en donde se ubican los diámetros objetivos fijos de control de ramas de 1, 2, 3 y 4 cm ($hdri$, $i=1, \dots, 4$) se resolvió para cada árbol la ecuación (22) en esos diámetros de rama fijos y se relacionó con el diámetro máximo de rama del árbol ($Drmax$), la altura a la que se encuentra

(*hrmax*) y con parámetros de rodal tales como el número de árboles por hectárea (*Nha*), el diámetro medio cuadrático (D_c), el área basal (*AB*), la altura promedio de los 100 árboles de mayor *DAP* por hectárea (*Hdom*) y la densidad relativa (*DR*). También se relacionó las alturas (*hrm*, *hrv*), los diámetros de ramas (*drm*, *drv*), los ángulos de ramas (*Arm*, *Arv*) y los diámetros del fuste (*Dfm*, *Dfv*) donde se ubican las primeras ramas muertas y vivas con el *DAP* y la altura del árbol, así como con parámetros de rodal. Se analizó la matriz de correlación de Pearson entre todas las variables, su nivel de significación estadística y finalmente se construyó un modelo predictor de la alturas de rama y del diámetro del cilindro nudoso vivo y muerto. Para el procesamiento y cálculo de estadísticos los datos fueron procesados utilizando los programas XLSTAT2012, ArcGIS 9.3 y R-project.

Línea de inminente mortalidad por competencia

Considerando que las parcelas utilizadas en este estudio no son de tipo permanentes, es imposible determinar sus tasas de mortalidad y relacionarlas con la densidad como en los modelos de Drew & Flewelling (1977), Drew & Flewelling (1979), Castedo *et al.* (2009), Mitchell (2000) y otros. Sin embargo, como lo advierte Newton (1997), la línea de inminente mortalidad por competencia corresponde a aquella densidad relativa en donde empieza la declinación del crecimiento neto volumétrico de acuerdo con la teoría de Langsaeter (Daniel *et al.*, 1982; Smith *et al.*, 1997) y donde se alcanza el máximo crecimiento volumétrico bruto.

Para determinar la zona de inminente mortalidad por competencia se midió el crecimiento anual periódico (*CAP*) volumétrico (hasta un índice de utilización de 10 cm) para un período de cinco años (2008-2012) mediante 101 parcelas temporales como ya fue descrito. Para su selección inicialmente se construyó un modelo de estimación de altura dominante y área basal mediante datos LiDAR (ver Anexo 2), sin embargo el nivel de explicación de los modelos construidos fue muy bajo (alrededor del 20-28% de explicación) al comparar los predictores con las alturas dominantes y áreas basales medidas en los inventarios, por ello fue desechado como método de búsqueda. El poblamiento de parcelas para cubrir todas las variaciones de densidad y de alturas dominantes fue inicialmente fácil, situación que se fue revirtiendo cada vez más debido a las dificultades para encontrar parcelas en situaciones cada vez menos frecuentes. Finalmente, se terminó de poblar el DMD con una búsqueda fina de parcelas en el predio utilizando la información de los modelos de elevación de copas junto a las imágenes VIS.

Con estos antecedentes se localizaron en terreno 30 parcelas de forma y tamaño variable y 71 parcelas de radio fijo de 200 m², estas fueron utilizadas para la determinación de la relación *CAP* vs. Densidad relativa (DR) utilizando el DMD de [Gezan et al. \(2007\)](#). Este DMD fue finalmente ajustado con los modelos construidos en este proyecto, considerando las líneas de cierre de copas y de auto-raleo.

En cada parcela medida se registraron los siguientes datos: ubicación espacial (coordenadas UTM) y superficie de la parcela (m²), origen del árbol (rebrote o semilla), número del árbol, especie, vitalidad (vivo o muerto) y *DAP* (geométrico). Una vez medidos todos estos atributos, se ordenó los árboles en valores crecientes de *DAP* y se seleccionaron los cuatro árboles centrales de cada cuartil de *DAP*. La información de crecimiento volumétrico de la parcela fue estimada como el crecimiento agregado volumétrico de los cuatro cuartiles, representados cada uno por el árbol central. Para cada árbol (cuartil) se midió adicionalmente la altura total y se extrajo con taladro JIM-GEM un tarugo de incremento radial a nivel del *DAP*, a este se le midió el crecimiento anual corriente pasado y un espesor de corteza. La preparación de los tarugos se realizó secándolos en microonda y montándolos con pegamento sobre una base de madera con un vaciado de 4 mm de radio, equivalente al del tarugo. Los tarugos fueron lijados con distinto grano hasta distinguir macroscópicamente los anillos anuales. Por seguridad, la lectura de radios se realizó utilizando una lupa electrónica USB Digital Microscope 400X marca CoolingTech. Las mediciones fueron hechas con precisión en décimas de micrón. La medición de espesor de corteza se realizó en verde, al momento de extraer el tarugo.

En virtud de que las parcelas se midieron en dos temporadas diferentes, se definió como período común de crecimiento entre 2008 y 2012, ya que todas las muestras coexistieron en ese período.

El *CAP* volumétrico de cada parcela en el período fue calculado como la diferencia en el volumen hasta un diámetro límite de utilización de 10 cm en el fuste estimado entre fines del 2012 (otoño del 2013) y comienzos del 2008 (invierno 2007). La función de volumen utilizada para este proyecto fue construida con una submuestra de 60 árboles del cuartil superior (dominante) que se describe en el Anexo 3. Si bien los árboles utilizados fueron del cuartil superior, es conocido que su conicidad es mayor a la de los árboles de los cuartiles inferiores, lo que da un margen de seguridad en las estimaciones del *CAP*.

El *CAP* volumétrico de la parcela es igual a la suma del *CAP* de sus cuatro cuartiles. A su vez el *CAP* de cada cuartil es igual al volumen del cuartil al 2012 menos el volumen del cuartil al 2008. Los volúmenes al 2012 y 2008 son iguales al volumen del árbol central del cuartil multiplicado por el número de árboles por hectárea de su respectivo cuartil. La función de volumen utilizada para la cubicación depende del *DAP* y de *H*. Para la estimación de los *DAP* y *H* en 2012 y 2008 se realizaron los siguientes cálculos:

Estimación de DAP pasado. Para estimar el *DAP* pasado de cada cuartil se restó al *DAP* con corteza actual el doble espesor de corteza más dos veces el crecimiento radial posteriores a 2012 y 2008 al *DAP* de la medición, respectivamente, y se le agregó la proporción de corteza estimado para 2012 y 2008 en relación con el *DAP* sin corteza actual.

Estimación de H pasado. Para estimar la altura pasada de cada cuartil se usó la ecuación generalizada de alturas construidas por Corvalán (2014) que se describe en el Anexo 1 y que es función de *Hdom* y del *DAP*. Esto es, conocido el *DAP* en 2012 y 2008 (estimado como se indica arriba), y *Hdom* actual (asumiendo que la altura dominante del rodal actual no ha cambiado sustancialmente en los últimos cinco años) es posible estimar su altura total. Es equivalente a decir que el cambio de altura del árbol se explica por su cambio en *DAP*, permaneciendo en un estrato de altura dominante relativamente constante.

Estimación del número de árboles pasado. Se asume que el número de árboles vivos de cada cuartil en el pasado no varió en los últimos 5 años con excepción de los árboles que en el pasado no alcanzaron a tener un *DAP* mínimo de 10 cm y aquellos que murieron. Cuando el *DAP* pasado del cuartil no alcanzó a 10 cm se asume que todo el cuartil desaparece al estar representado por el árbol central.

Esta forma de cálculo simplificada del *CAP* tiene una debilidad que se debe considerar y es la inexistencia de registros de mortalidad durante el período, lo que no permite realizar una estimación del crecimiento bruto, y de existir, el *CAP* bruto sería superior. En este trabajo se asume que no hay grandes cambios en cinco años. Por esa razón se evaluó solo el *CAP* en volumen neto.

Los *CAP* se relacionaron con la densidad relativa –utilizando la línea de auto-raleo construida en este estudio– para determinar la zona de máximo crecimiento no sometida a inminente mortalidad por competencia.

Isolíneas de diámetro medio cuadrático y de volumen total

Para incorporar las isolíneas de D_c y Vol en el DMD se relacionaron esas variables con los parámetros de rodal $Hdom$, Nha y D_c por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\ln(D_c) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(Nha) + \beta_2 * \ln(Hdom) \quad (23)$$

$$\ln(Vol) = \beta_3 + \beta_4 * \ln(D_c) + \beta_5 * \ln(Hdom) + \beta_6 * \ln(Nha) \quad (24)$$

Estas ecuaciones, reportadas por Valbuena *et al.* (2008), se ajustaron simultáneamente empleando el enfoque SUR (*Seemingly unrelated regression*) para ajuste simultáneo de ecuaciones. Este permite una estimación de parámetros más eficiente en términos que relaciona variables que están presentes en ambos modelos (Furnival & Wilson, 1971). El proceso de ajuste se llevó a cabo en el *software* R (R Development Core Team 2014) mediante el paquete Systemfit (Henningsen & Hamann, 2007).

6. RESULTADOS

6.1. Línea de cierre de copas

Los parámetros de los modelos (13) al (19) se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros estimados de los modelos de diámetro de copa.

Modelos	Parámetros estimados			
	α	β	γ	$\sigma\epsilon$
13	3,505	0,150		1,759
14	6,253	0,001		2,393
15	-7,198	5,296		2,596
16	3,129	0,173	-2e-04	1,753
17	2,169	0,410	0,799	1,733
18	1,062	0,619		1,763
19	1,581			1,757

Del análisis conjunto de la Tabla 6.1 y el análisis gráfico de residuos se deduce que:

- Las ecuaciones (13), (16), (17), (18) y (19) tienen los más bajos errores estándar de estimación, descartándose así los modelos (14) y (15) propuestos por Foli *et al.* (2003).
- La dispersión de residuos de las ecuaciones (13) y (16) tienen un comportamiento similar, sin embargo la ecuación (13) presenta en su extremo inferior una marcada oscilación de residuos con una subestimación de diámetro de copa (clases diamétricas inferiores a 10 cm de *DAP* y una sobreestimación entre los 10 y 30 cm de *DAP*) originados en la rigidez del modelo, esto lo invalida para su aplicación en rodales recién establecidos y donde se requiere evaluar la densidad inicial y el modelo (16) al incorporar un término cuadrático de *DAP*, no logra mejorar sustancialmente al modelo (13).
- Las ecuaciones (17), (18) y (19) presentan bajo error estándar y una distribución de residuos prácticamente igual. Si bien es cierto que la ecuación

(17) es la que presenta el error estándar más pequeño, la constante del modelo genera en los diámetros cercanos al origen un sesgo superior a los modelos (18) y (19), descartándose por esta razón.

- La ecuación (18) tiene mayor error estándar que la ecuación (19).
- La ecuación (19) tiene la mejor distribución de residuos estandarizados y es la más simple de todas, siendo esta la elegida para la construcción del DMD.

La relación DC vs DAP determina finalmente la línea de cierre de copas (LCC) en los diagramas de manejo de la densidad. Para este estudio se deduce la siguiente Tabla que ilustra la LCC para los bosques de roble altoandinos en la VII Región.

Tabla 6.2. Línea de cierre de copas para roble, VII Región.

DAP (cm)	DC (m)	Nha^{-1}	AB (m^2ha^{-1})
5	108,9	1662,3	3,3
8	78,7	995,3	4,4
10	62,6	691,7	5,4
15	45,2	414,1	7,3
20	35,9	287,8	9,0
25	30,1	217,0	10,7
30	26,0	172,3	12,2
35	23,0	141,8	13,6
40	20,6	119,7	15,0
45	18,8	103,2	16,4
50	17,3	90,3	17,7
55	16,0	80,0	19,0
60	14,9	71,7	20,3

6.2. Línea de auto-raleo

El modelo de Reineke (1933) fue ajustado mediante el método de los mínimos cuadrados y el de regresión estocástica de frontera. Los modelos ajustados para ambas variantes son como siguen, respectivamente:

- Ajuste mediante método de mínimos cuadrados:

$$\ln Nha = 11,202 - 1,4822 * \ln D_c \quad (25)$$

- Ajuste mediante regresión estocástica de frontera:

$$\ln N_h a = 12,1566 - 1,4823 * \ln D_c \quad (26)$$

Las estadísticas de ajuste para el método de mínimos cuadrados es el que sigue:

Coefficientes:				
	Estimado	Error estándar	valor "t"	Pr (> t)
Constante	11,2020	0,1978	56,6	<2e-16
ln.d	-1,4822	0,0657	-22,5	<2e-16
Error estándar residual: 0,433 con 514 gl				
R ² múltiple: 0,497; R ² ajustado: 0,496				
F: 508 (1,514); pi: <2e-16				

Las estadísticas para el ajuste mediante regresión estocástica de fronteras es la siguiente:

Modelo de análisis estocástico de frontera			
	Estimado	Error estándar	valor "t"
Constante	12,1500847	0,228420	53,53000
ln.d	-1,4822648	0,065613	-22,59109
sigmau2	0,0042495	0,011437	0,37156
sigmav2	0,1849649	0,012294	15,04529

Por ello se usará la ecuación (26) para representar la relación máxima densidad versus tamaño medio de rodales de roble en el área de estudio.

6.3. Línea de control del tamaño de ramas

Las estadísticas descriptivas de la muestra se indican en la Tabla 6.3, tanto a nivel de árbol como de rodal. Los rodales muestreados cubren bien la amplitud de los DMD usuales, tanto en número de árboles por hectárea y área basal, diámetro medio cuadrático y altura dominante. Solo no se encontraron muestras bajo el 21,5% de densidad relativa. El coeficiente de variación de la muestra para todos los parámetros de rodal está entre 20 y 50%. En cuanto a

los árboles del dosel dominante medidos, tanto su tamaño de *DAP* como de *H* cubre un rango adecuado para el análisis del tamaño de ramas.

Tabla 6.3. Estadísticas descriptivas de los rodales y de los árboles.

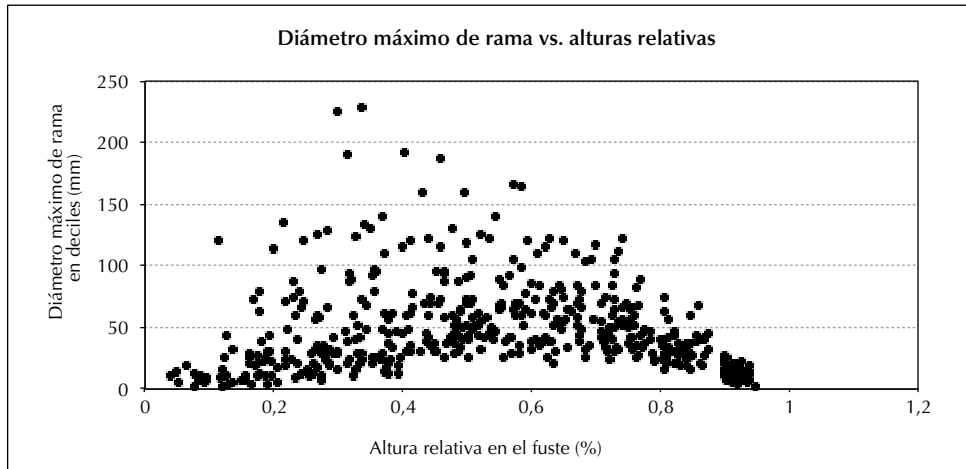
Variables de estado	Estadísticas descriptivas				
	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Del rodal					
Nha	1306,0	250,0	2.789,6	476,8	36,5
D_c (cm)	18,4	12,6	34,0	4,3	23,6
AB (m^2ha^{-1})	34,7	13,1	76,2	17,2	49,5
H_{dom} (m)	17,7	9,6	26,6	4,2	23,7
DR (%)	50,6	21,5	112,0	21,9	43,3
Del árbol					
hdr_1 (m)	1,3	0,2	5,2	1,1	85,1
hdr_2 (m)	2,3	0,5	8,3	1,7	71,0
hdr_3 (m)	3,3	0,6	9,0	2,0	60,8
hdr_4 (m)	4,3	0,8	10,5	2,5	58,4
dr_{max} (cm)	106,0	45,0	229,0	40,5	38,2
hr_{max} (m)	8,5	2,1	17,5	3,4	40,2
hrm (m)	3,6	0,7	10,3	2,07	58,1
d_{rm} (mm)	28,4	2,0	120,0	26,9	95,0
Arm (°)	54,2	7,0	100,0	27,1	50,0
D_{fm} (cm)	21,6	13,7	36,3	5,11	23,6
hrv (m)	7,1	2,2	13,9	2,8	39,4
d_{rv} (mm)	85,2	15,0	225,0	47,0	55,2
Arv (°)	28,5	8,0	60,0	11,6	40,8
D_{fv} (cm)	17,8	10,9	35,7	5,03	28,3
DAP (cm)	17,2	6,6	33,1	6,0	34,6
H (m)	16,7	10,0	22,9	3,4	20,4

Perfil vertical de ramas máximas en el árbol

La dispersión de valores de diámetros máximos de ramas en la muestra se observan en el Gráfico 6.1, donde se aprecia que las ramas de mayor tamaño se encuentran en torno a la mitad de la altura y con valores decrecientes hacia la base y el ápice. En la gráfica se aprecian algunas ramas de diámetro exagerado entre el segundo y quinto decil de altura, que se explican en anotaciones

recogidas en terreno como ocasionadas por ramas prolépticas. En tanto, el coeficiente de variación es máximo entre el segundo y cuarto decil, disminuyendo hacia los extremos.

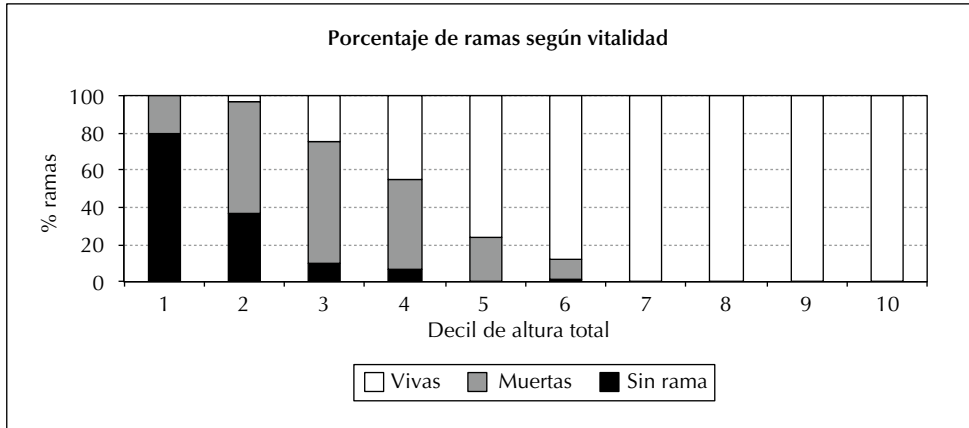
Gráfico 6.1. Diagrama de dispersión de diámetros máximos por deciles.



En cuanto al porcentaje de vitalidad de las ramas, y considerando solo la posición de las primeras ramas muertas y vivas continuas de cada árbol, es posible señalar que los árboles con poda natural tienen su máxima presencia en el primer decil con 80%, disminuyendo hasta desaparecer en el quinto decil, como se observa en el Gráfico 6.2. En cuanto a las ramas muertas, estas se presentan desde el primer y hasta el sexto decil, teniendo su máximo en el tercer decil con 65% y, finalmente, las ramas vivas están presentes desde el segundo hasta el décimo decil, alcanzando el máximo en forma estable a partir del séptimo decil en 100%.

Las alturas sobre el suelo de rama a las que se encuentran los cuatro tamaños de diámetro objetivos (1, 2, 3 y 4 cm) tienen valores promedio de 1,3; 2,3; 3,3 y 4,3 m, respectivamente, en tanto el diámetro promedio de la rama máxima del árbol fue de 10,6 cm y se encuentra a 8,5 m. En cuanto a los valores extremos, la altura a la que se encuentra una rama de 1 cm está entre los 0,2 y 5,2 m. Para 2 cm esta variación cubre el rango de 0,5 a 8,3 m, para 3 cm entre 0,6 y 9,0 m y para 4 cm entre 0,8 y 10,5 m. En cuanto al diámetro de la rama más gruesa del árbol presentó valores extremos entre 4,5 y 22,9 cm, lo que limita en gran parte la obtención de trozas superiores de alta calidad, debido a su tamaño máximo y su alta variabilidad.

Gráfico 6.2. Porcentaje de árboles clasificados según grado de vitalidad de acuerdo con la ubicación de las primeras ramas muertas y vivas.



En relación con las primeras ramas muertas, los valores promedio se encuentran a 3,57 m de altura, con un diámetro de 28,4 mm y un ángulo de inserción de 54,2°. El diámetro del cilindro fustal donde se encuentra es en promedio 21,6 cm. Este último es el atributo más estable con un coeficiente de variación de solo 23,6%. La altura, el diámetro de rama y el ángulo de inserción presentan coeficientes de variación que superan el 50%, especialmente el diámetro de la primera rama que llega al 95%.

Considerando las primeras ramas vivas, los valores promedio se encuentran a 7,12 m de altura, con un diámetro de 85,2 mm y un ángulo de inserción de 28,5°. El diámetro del cilindro fustal donde se encuentra es, en promedio, 17,8 cm. Este último atributo, igual que en las ramas muertas, es el más estable con un coeficiente de variación de 28,3%. Tanto la altura, el diámetro de rama y el ángulo de inserción presentan coeficientes de variación muy inferiores a los de las ramas muertas, con valores de 39,4; 55,2, y 40,8%, respectivamente.

Matriz y modelo de diámetro de rama fijo

La matriz de correlaciones se muestra en la Tabla 6.4, en la que se señalan sobre la diagonal de la matriz el coeficiente de correlación de Pearson y bajo ella el nivel "p" de significación. Los valores en negrita y cursiva indican valores muy significativos y las negritas normales indican valores significativos. Las correlaciones entre *hdri* han sido omitidas por provenir de un modelo común en su estimación.

Tabla 6.4. Matriz de correlación y significación estadística.

Variable	<i>hdr1</i>	<i>hdr2</i>	<i>hdr3</i>	<i>hdr4</i>	<i>drmax</i>	<i>hrmax</i>	<i>Nha</i>	D_c	<i>AB</i>	<i>Hdom</i>	<i>DR</i>
<i>hdr1</i>	1				-0,13	0,62	0,37	0,06	0,23	0,25	0,28
<i>hdr2</i>		1			-0,15	0,67	0,39	0,05	0,24	0,25	0,30
<i>hdr3</i>			1		-0,19	0,68	0,38	0,01	0,20	0,25	0,26
<i>hdr4</i>				1	-0,26	0,66	0,38	-0,02	0,16	0,26	0,23
<i>drmax</i>	0,313	0,261	0,139	0,053	1	0,00	-0,01	0,24	0,15	0,22	0,12
<i>hrmax</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,981	1	0,39	0,27	0,49	0,35	0,50
<i>Nha</i>	0,003	0,002	0,002	0,004	0,952	0,002	1	-0,20	0,62	0,23	0,77
D_c	0,637	0,704	0,934	0,906	0,064	0,034	0,118	1	0,58	0,43	0,41
<i>AB</i>	0,080	0,060	0,134	0,227	0,247	0,000	0,000	0,000	1	0,45	0,98
<i>Hdom</i>	0,053	0,053	0,058	0,051	0,091	0,006	0,079	0,001	0,000	1	0,44
<i>DR</i>	0,027	0,018	0,044	0,084	0,369	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	1

Del análisis se deduce que todas las alturas *hdr* se correlacionan positiva y muy significativamente con *hrmax*, y negativamente y sin significación con el diámetro máximo de la rama mayor del árbol. Las relaciones son crecientes con el tamaño del diámetro de rama objetivo.

Otro resultado muy interesante es la positiva y significativa correlación de *hdr* con la densidad del rodal, medida en términos absolutos por el número de árboles por hectárea y en términos relativos con la densidad relativa del rodal. Ni el diámetro medio cuadrático, ni el área basal ni la altura dominante mostraron correlaciones significativas con estas variables. El diámetro de rama máxima del árbol tampoco mostró correlación significativa con ningún parámetro de rodal, pudiendo estar bajo control genético como lo indican algunos investigadores (Lowell *et al.*, 2014), sin embargo la altura en donde esta se encuentra está positiva y muy significativamente correlacionada con la densidad, la altura dominante, el área basal y el número de árboles por hectárea y significativamente correlacionada con el diámetro medio cuadrático. Nótese que *hdr* está fuertemente correlacionado con *hrmax*.

Se modeló *hdr* en función de la densidad relativa y no del número de árboles por hectárea, a pesar que con esta última variable muestra mayor nivel de correlación debido a que la densidad relativa expresa de mejor manera la ocupación del espacio de crecimiento y es la variable más utilizada en los diagramas de manejo de la densidad.

El modelo usado tuvo la forma lineal:

$$hdr_i = \alpha + \beta * DR \tag{27}$$

Donde,

hdr_i es la altura sobre el nivel de suelo donde se encuentra una rama inferior de máximo tamaño i cm.

DR es la densidad relativa del rodal medida en el 2014.

α , β parámetros de ajuste.

Los valores de α , β y los indicadores de bondad de ajuste y significación estadística se muestran en la Tabla 6.5.

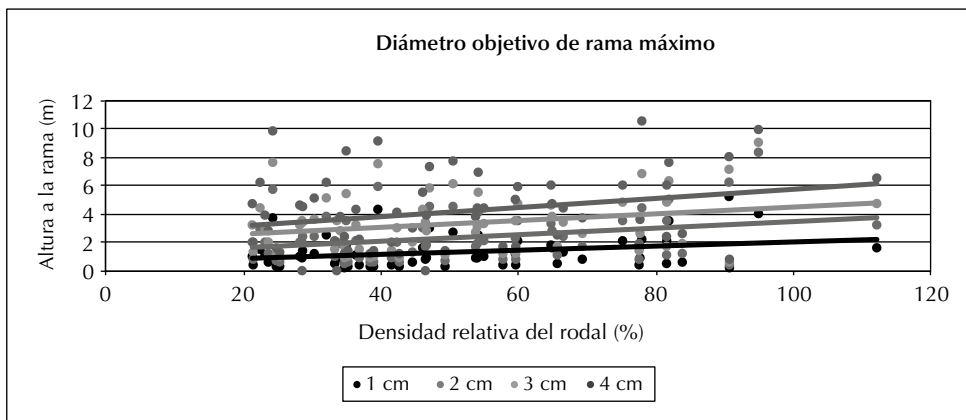
Tabla 6.5. Parámetros y bondad de ajuste del modelo (27).

Diámetro de rama objetivo	Parámetros del modelo		Bondad de ajuste		
	α	β	Coefficiente de determinación	Error estándar	Grados de libertad
1	0,55970	0,01452	0,08117	1,081	58
2	1,13608	0,02299	0,09222	1,596	58
3	2,08213	0,02373	0,06786	1,945	58
4	2,98289	0,02635	0,05336	2,485	55

Los colores negrita y cursiva indican valores muy significativos y los negrita normales indican valores significativos.

La gráfica del ajuste y datos se observa en el Gráfico 6.3.

Gráfico 6.3. Modelos de estimación de diámetros de rama fijos en función de la densidad de los rodales.



Se observa que a medida que la densidad del rodal aumenta, la altura a la que se encuentra una rama de un cierto tamaño máximo fijo i ($i=1, 2, 3$ y 4 cm) es creciente y que, para igual densidad relativa del rodal, las alturas de ramas de tamaño crecientes se ubican a mayor altura.

En términos prácticos, si se desea obtener una troza basal con nudos contenidos de tamaño $i=1, 2, 3$ o 4 cm en todo su largo, se requiere que la altura de término donde se encuentra la troza en pie sea mayor o igual al valor de la solución de la ecuación de la altura de diámetro de contención de rama requerido. Asumiendo, por ejemplo, que se desea contener mediante la densidad del rodal el tamaño máximo de nudo o rama de una troza basal de $3,6$ m y que esta no supere los 3 cm de diámetro en todo su largo, y asumiendo una altura de tocón de $0,2$ m, se requiere entonces encontrar la densidad relativa mínima en la ecuación del diámetro 3 cm a la que se encuentra a $3,8$ m. Resolviendo para los cuatro valores de rama objetivo las ecuaciones respectivas, se requieren densidades relativas mínimas de 223% para tener ramas contenidas de no más de 1 cm, de 115% para un diámetro de 2 cm, 72% para un diámetro de 3 cm y 31% para diámetros de 4 cm. Debe ser considerado que densidades relativas sobre 100% son infrecuentes y son valores referenciales teóricos producto de la extrapolación. Considerando los antecedentes disponibles del tamaño de nudo máximo de rama de 3 cm en la literatura, se debe considerar entonces que el roble requiere altas densidades relativas para contener el tamaño máximo de rama en la troza basal.

Las relaciones entre los diámetros de los cilindros nudosos vivos y muertos con el *DAP* tienen la forma:

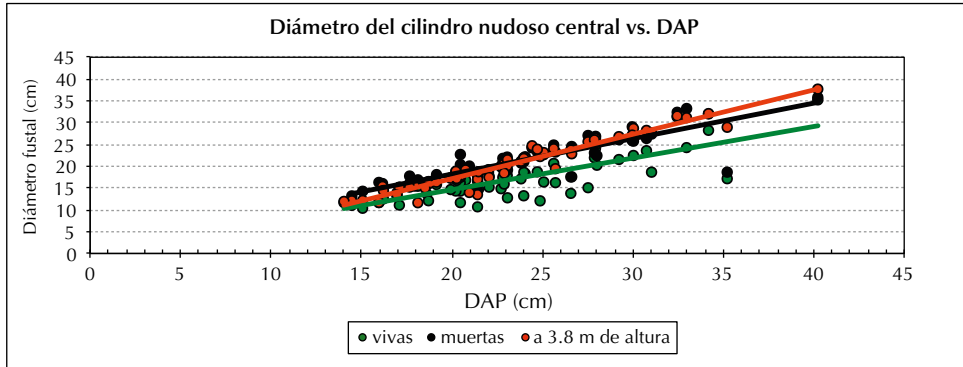
$$dr(m, v) = \delta + \gamma * DAP \tag{28}$$

Los resultados del ajuste se muestran en la Tabla 6.6 y se ilustran en el Gráfico 6.4.

Tabla 6.6. Parámetros y bondad de ajuste del modelo (28).

Primeras ramas	Parámetros del modelo		Bondad de ajuste		
	δ	γ	Coefficiente de determinación R^2 (%)	Error estándar (cm)	Grados de libertad
Muertas	2,38770	0,81471	0,7683	2,48	55
Vivas	0,83371	0,72536	0,6352	3,06	58

Gráfico 6.4. Modelos de estimación de cilindros nudosos de ramas vivas y muertas.



Del análisis gráfico se deduce que la diferencia entre los diámetros del cilindro nudoso muerto y vivo es de 3 a 5 cm considerando árboles cuyo *DAP* está entre 15 a 40 cm. Esto significa que en el proceso de oclusión natural hay una pérdida neta de madera libre de nudo equivalente a esa diferencia, lo que no es menor considerando la relación cuadrática que existe entre el *DAP* y el volumen de un árbol. El *DAP* de equilibrio a partir del cual se produce un diámetro fustal superior al diámetro del cilindro nudoso muerto es 25 cm al estimar mediante una regresión lineal los diámetros fustales a una altura de 3,8 m (*df*_{3,8}) como función del *DAP*. Esta regresión tiene la forma:

$$df_{3,8} = -2.7164 + 1.0172 * DAP \quad (29)$$

Con $R^2=0,9328$.

Determinación del período máximo de mortalidad de las ramas

La diferencia de años que transcurren entre la fecha de formación de la primera rama muerta y la primera rama viva del fuste, evaluada mediante análisis de tallo en una muestra aleatoria de 12 árboles arroja como resultado un período de mortalidad aproximado de 8,5 años con un coeficiente de variación de 100%. Los valores máximos y mínimos fueron de 28 y 1 año, respectivamente.

6.4. Línea de inicio de mortalidad por competencia

Las estadísticas del crecimiento anual periódico volumétrico (*CAP*) por hectárea y por árbol de las 100 parcelas evaluadas se indica en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Estadísticas del crecimiento anual periódico de los rodales.

Estadístico	A nivel de hectárea (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	A nivel de árbol (m ³ árb ⁻¹ año ⁻¹)
Promedio	7,3	0,0070
Desviación estándar	3,7	0,0049
Coefficiente de variación (%)	50,8	69,4

El *CAP* a nivel de árbol fue calculado como el *CAP* en volumen del rodal dividido por el número de árboles estimado por hectárea a comienzos del 2008.

Para determinar la línea de inminente mortalidad por competencia del DMD se estableció las correlaciones entre el *CAP* a nivel de hectárea con los parámetros de rodal al final del periodo y algunos parámetros al inicio del período. Las correlaciones se señalan en la Tabla 6.8.

Del análisis de correlación se advierte que el *CAP* a nivel de rodal está muy significativa y positivamente correlacionado con todos los parámetros de rodal evaluados al inicio del período a excepción del diámetro medio cuadrático. También está correlacionado con la altura dominante evaluada al final del período. Esta correlación señala la importancia del nivel de ocupación del espacio y el estado de desarrollo de los renovales en el crecimiento. El factor que mayor incidencia tiene es la densidad relativa, y en un plano levemente inferior el volumen total, el área basal y la altura dominante. Es destacable que el rango intercuartil (*RI*) de los *DAP* sea significativo, corroborando que también da cuenta del crecimiento, en un símil a lo que sería la edad en un rodal coetáneo.

A nivel de árbol, el crecimiento se relaciona negativa y significativamente con el número de árboles por hectárea y la densidad relativa. Se relaciona positivamente con el diámetro medio cuadrático y con el rango intercuartilíneo, así como con el crecimiento volumétrico por hectárea y la altura dominante.

Debido a que en este trabajo se intenta determinar la llamada “línea de inminente mortalidad por competencia” como aquel punto donde se encuentra la máxima tasa de crecimiento, se ajustó un modelo parabólico sin constante que estima el *CAP* como función de *RI* para tres rangos de densidad relativa:

Tabla 6.8. Matriz de correlaciones de Pearson y nivel de significación entre *CAP* y parámetros de rodal.

Correlaciones de Pearson (sobre la diagonal) y nivel de significación (bajo la diagonal) entre el crecimiento anual periódico en volumen a nivel de rodal y parámetros de rodal. En negrita y cursiva correlaciones muy significativas.

	<i>Vol/ha</i> 2007	<i>Hdom</i> 2014	<i>Nha</i> 2007	<i>D_c</i> 2007	<i>AB</i> 2007	<i>DR</i> 2007	<i>RI</i> 2007	<i>CAP/ha</i>	<i>CAP/árb</i>
	Coeficiente de correlación de Pearson (sobre diagonal)/ nivel de significación (bajo diagonal)								
<i>Vol/ha</i> 2007	1	0,58	0,29	0,69	0,91	0,77	0,76	0,55	0,15
<i>Hdom</i> 2014	0,0000	1	0,18	0,32	0,39	0,37	0,33	0,52	0,16
<i>Nha</i> 2007	0,0032	0,0667	1	-0,28	0,53	0,76	-0,26	0,38	-0,54
<i>D_c</i> 2007	0,0000	0,0011	0,0041	1	0,58	0,31	0,93	0,19	0,4
<i>AB</i> 2007	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,94	0,61	0,55	-0,03
<i>DR</i> 2007	0,0000	0,0002	0,0000	0,0017	0,0000	1	0,34	0,57	-0,23
<i>RI</i> 2007	0,0000	0,0007	0,0092	0,0000	0,0000	0,0005	1	0,22	0,41
<i>CAP/ha</i>	0,0000	0,0000	0,0001	0,0649	0,0000	0,0000	0,0309	1	0,37
<i>CAP/árb</i>	0,1315	0,1218	0,0000	0,0000	0,7297	0,0242	0,0000	0,0002	1

menores a 40%, entre 40% y 80% y sobre 80%. Las respectivas ecuaciones son las siguientes:

$$CAP = 0,15487 * RI - 0,00044 * RI^2 \quad (30)$$

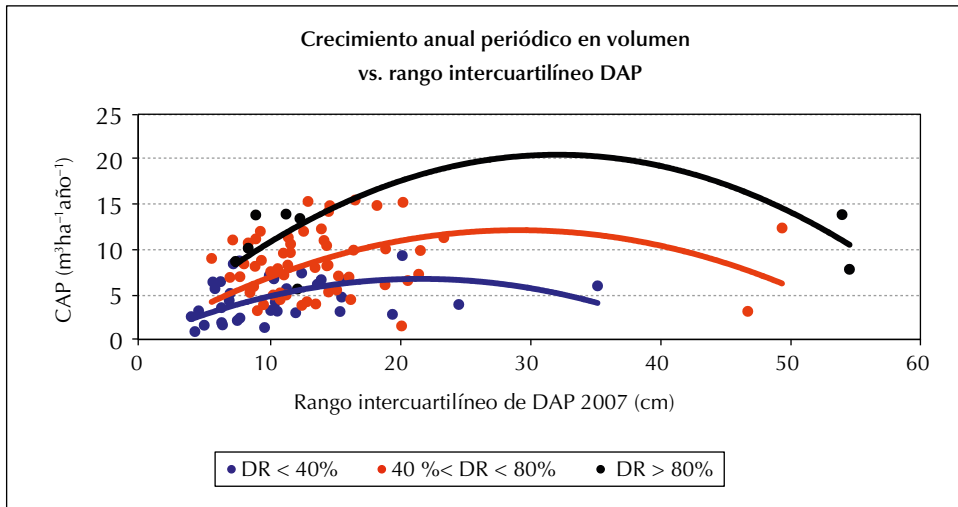
$$CAP = 0,834126 * RI - 0,014338 * RI^2 \quad (31)$$

$$CAP = 1,279857 * RI - 0,019928 * RI^2 \quad (32)$$

Todas estas ecuaciones tienen coeficientes muy significativos.

Derivando y resolviendo las ecuaciones (30) a (32) se encuentra que el máximo crecimiento está en rangos intercuartilíneos de *DAP* de 21,7; 29,1 y 32,1 cm, respectivamente, estos se pueden apreciar el Gráfico 6.5.

Gráfico 6.5. Modelos de crecimiento en volumen como función del rango intercuartiléneo para diferentes niveles de densidad relativa de los rodales.



Evaluando los máximos en cada ecuación se puede observar que los CAP se presentan con valores de 6,7; 12,1 y 20,5 m³ha⁻¹año⁻¹ en renovales con densidades relativas menores a 40%, entre 40 y 80% y sobre 80%, respectivamente, evidenciando el impacto de la densidad relativa y del nivel de desarrollo del rodal en el crecimiento. De acuerdo con estos resultados los renovales de roble no siguen la regla aplicada por casi todos los DMD contruidos en los cuales se asume que la densidad máxima se encuentra con densidades entre 40 y 60% de acuerdo con lo expuesto por Newton (1997). La teoría de mortalidad y crecimiento expuesto por Langsaeter parece cumplirse solo cuando se trata de rodales estrictamente homogéneos en edad, estructura y distribución espacial de los individuos. Los renovales de roble parecen escaparse de esto, de otra forma la ecuación (32) debería estar bajo la ecuación (31).

Para determinar la densidad relativa en donde se produce el mayor crecimiento se ajustó un modelo parabólico sin constante, cuya ecuación es:

$$CAP = 0,2062540 * DR - 0,0009487 * DR^2 \quad (33)$$

Esta ecuación tiene un valor $p < 2,2e-16$ para una prueba $F_{(2,98 \text{ g.l.})}$, ambos coeficientes muy significativos. Derivando y resolviendo la ecuación (33) el máximo crecimiento se encuentra con una DR igual a 108%.

De acuerdo con la ecuación (33), los *CAP* varían según la siguiente tabla:

Tabla 6.9. Crecimiento anual periódico según nivel de densidad relativa.

<i>DR</i> (%)	<i>CAP</i> (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
15	2,9
30	5,3
45	7,4
60	9,0
75	10,1
90	10,9

Considerando que en este proyecto el manejo está orientado a la producción de madera con tamaño de nudos controlados en la primera troza, de igual forma es necesario acotar la reducción de la densidad a un valor mínimo aceptable para concentrar el crecimiento en los árboles que sean seleccionados para la cosecha final y no disminuir en exceso la tasa de crecimiento del rodal. Arbitrariamente se considera que bajar la densidad más allá de 60% puede resultar en una pérdida de volumen que no alcance a compensar el aumento en el valor de las trozas basales. La pérdida de volumen se deduce de la Tabla 6.9 o de la ecuación (33). Estos valores, por ejemplo, pueden alcanzar su valor límite en 3,4 m³ha⁻¹año⁻¹ si se baja la densidad relativa de 100% a 60%. La decisión de cuál es el límite de la baja en la densidad debe obedecer a una evaluación económica que va más allá de los objetivos del presente estudio, pero resulta fácil de implementar.

6.5. Isolíneas de volumen y diámetro medio cuadrático

Los resultados del ajuste simultáneo de las ecuaciones (23) y (24) son las siguientes:

$$\ln D_c = 3,75858 - 0,2962 * \ln Nha + 0,4556 * \ln Hdom \quad (34)$$

$$\ln Vol = 12,1566 - 1,4823 * \ln D_c + 0,9236 * \ln Hdom + 0,9699 * \ln Nha \quad (35)$$

Los estadísticos del modelo ajustado (ecuaciones 34 y 35) son los siguientes:

	N	DF	SSR	MSE	RMSE	R ² Adj	R ²
Modelo (34)	100	97	3,763	0,0388	0,1970	0,4217	0,4097
Modelo (35)	100	63	3,397	0,0354	0,1881	0,9195	0,9169

La matriz de covarianza de los residuales usados para la estimación:

	Modelo (34)	Modelo (35)
Modelo (34)	3,879e-02	-2,068e-14
Modelo (35)	-2,068e-14	3,538e-02

La matriz de covarianza de los residuales:

	Modelo (34)	Modelo (35)
Modelo (34)	3,879e-02	-9,024e-14
Modelo (35)	-9,024e-14	3,538e-02

La matriz de correlaciones de los residuales

	Modelo (34)	Modelo (35)
Modelo (34)	1,0	-2,436e-12
Modelo (35)	-9,024e-14	1,0

Los estimadores (est), errores estándar (SE), valores t y Pr(<|t|) son los siguientes:

Modelo (34)	est	SE	t	Pr(< t)
(Intercepto)	3,75858	0,3764	9,986	<2e-16
ln <i>Nha</i>	-0,29616	0,04298	-6,890	5,6e-10
ln <i>Hdom</i>	0,45564	0,08443	5,397	4,8e-07

Error estándar residual 0,197 con 97 gl		
SSR: 3,7628	MSE: 0,0388	Raíz (MSE): 0,197
R ² múltiple: 0,4217	R ² Ajustado: 0,4097	

Modelo (35)	est	SE	t	Pr(< t)
(Intercepto)	-10,37844	0,51193	-20,27	<2e-16
ln <i>D_c</i>	2,05063	0,09697	21,15	<2e-16
ln <i>Hdom</i>	0,92360	0,09194	10,04	<2e-16
ln <i>Nha</i>	0,96990	0,05010	19,38	<2e-16

Error estándar residual 0,1881 con 96 gl		
SSR: 3,3967	MSE: 0,0354	Raíz (MSE): 0,1881
R ² múltiple: 0,9195	R ² Ajustado: 0,9169	

6.6. Diagrama de manejo de la densidad

El diagrama de manejo de la densidad final para renovales de roble de la precordillera del Maule propuesto en este proyecto está compuesto por el siguiente conjunto de ecuaciones:

Línea de cierre de copas:

$$Nha = (10.000 / (Dc^{(1/1,581)})^2 * (\pi / 4) \quad (36)$$

Línea de auto-raleo:

$$Nha = EXP(12,1566 - 1,4823 * \ln D_c) \quad (26)$$

Líneas de control de tamaño de ramas:

$$dr_1 = DR \geq 223\% \quad (37)$$

$$dr_2 = DR \geq 115\% \quad (38)$$

$$dr_3 = DR \geq 72\% \quad (39)$$

$$dr_4 = DR \geq 31\% \quad (40)$$

Zona de crecimiento mínimo:

$$CAP10 = DR * 0,72986 \quad (41)$$

$$CAP9 = DR * 0,60436 \quad (42)$$

$$CAP8 = DR * 0,50533 \quad (43)$$

$$CAP7 = DR * 0,42086 \quad (44)$$

donde los índices (10, 9, 8 y 7) son los crecimientos anuales periódicos mínimos a mantener en el proceso de manejo ($m^3ha^{-1}año^{-1}$).

Isolínea de diámetro medio cuadrático:

$$D_c = EXP(3,7586 - 0,2962 * \ln Nha + 0,4556 * \ln Hdom) \quad (45)$$

Isolínea de volumen hasta un índice de utilización de 10 cm:

$$Vol = EXP(-10,3784 + 2,0506 * \ln D_c + 0,9236 * \ln Hdom + 0,9699 * \ln Nha) \quad (46)$$

A continuación se presentan dos expresiones gráficas del mismo DMD, uno para todo el rango de tamaños y otro para diámetros cuadráticos superiores a 20 cm.

Gráfico 6.6. Diagrama de manejo de la densidad para roble. Todo el rango diamétrico.

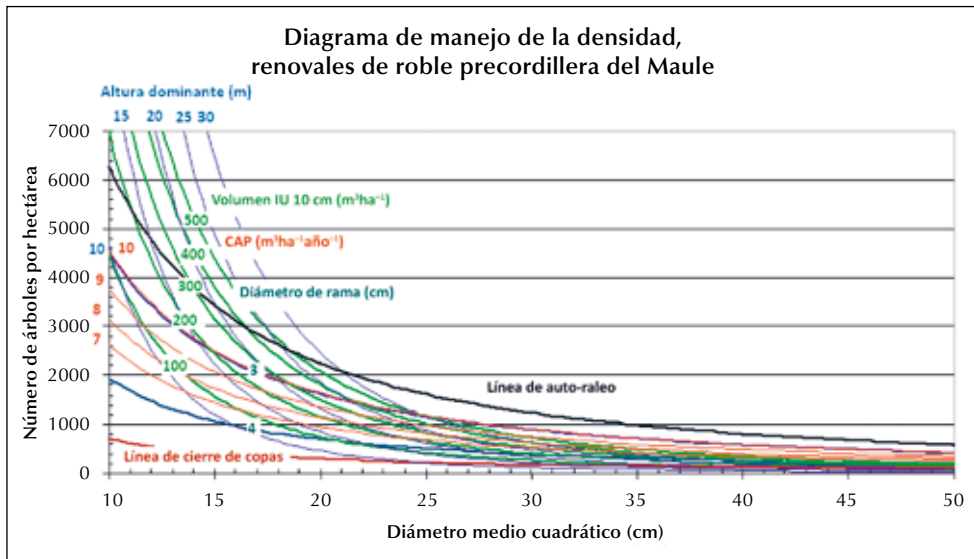
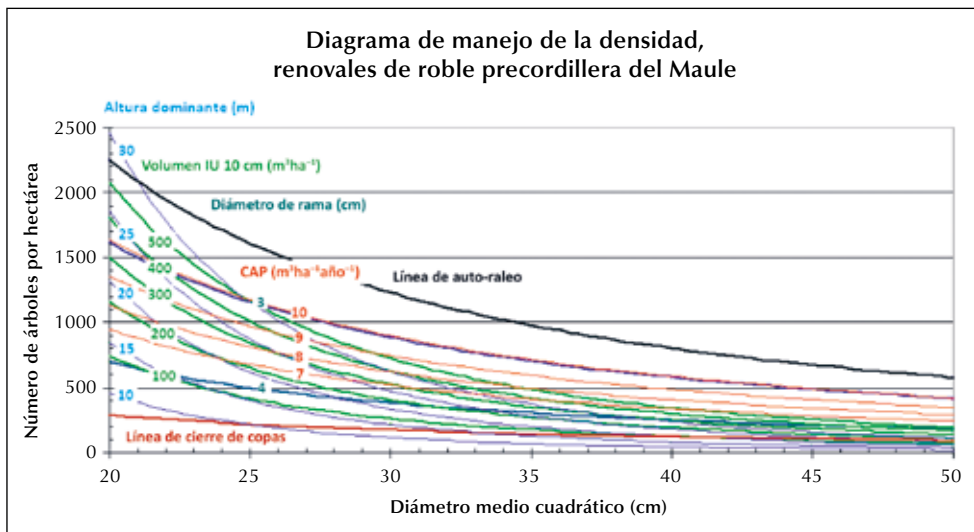


Gráfico 6.7. Diagrama de manejo de la densidad. Diámetro medio cuadrático superior a 20 cm.



6.7. Modo de aplicación del diagrama

Para poder aplicar el modelo se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Medir para el rodal el número de árboles por hectárea (Nha), el diámetro medio cuadrático (D_c) (o el área basal) e idealmente la altura dominante ($Hdom$). Considere que el rodal debe tener al menos 60% de árboles de la especie roble, debe estar en una pendiente inferior a 45% y tener al menos 100 árboles por hectárea.
- 2) Calcular el volumen inicial del rodal hasta un índice de utilización de 10 cm con la información indicada en 1) utilizando la ecuación (46):

$$Vol = EXP(-10,3784 + 2,0506 * \ln D_c + 0,9236 * \ln Hdom + 0,9699 * \ln Nha)$$

Si no ha medido la altura dominante, ya que conoce el D_c y Nha , puede despejarla de la ecuación (45):

$$D_c = EXP(3,7586 - 0,2962 * \ln Nha + 0,4556 * \ln Hdom)$$

Hay variaciones de la altura dominante que no quedan bien capturadas por la densidad –entre ellas el efecto de la calidad de sitio–, que en este trabajo no pudo ser evaluado, por lo que es recomendable medir $Hdom$.

- 3) Deben definirse las condiciones del rodal para la cosecha final basado en la altura dominante o volumen final, el diámetro medio cuadrático y el tamaño máximo de rama de la primera troza (de 3,6 m). Se ha considerado en este trabajo diámetros de 1, 2, 3 y 4 cm. Para definir el rodal objetivo se debe utilizar el diagrama más adecuado a su situación (gráficos 6.7 o 6.8) dependiendo del tamaño del rodal.
- 4) Deben marcar en el DMD el punto de inicio del rodal usando las variables número de árboles por hectárea y diámetro medio cuadrático. Ese punto fijará las opciones de manejo a futuro. Le llamaremos punto A. Ubique la curva de CAP sobre la que se encuentra el punto A en el DMD. Esa curva representará la trayectoria de máxima densidad a la que desarrollará el rodal o curva A.
- 5) Se debe marcar en el gráfico el punto donde se desea que el rodal llegue en la cosecha final. Para ello elija la variable altura dominante o volumen final y el diámetro medio cuadrático. Márquelo en el diagrama. Le llamaremos punto Z. Ubique la curva de CAP sobre la que se encuentra el punto Z en el DMD. Esa curva representará la trayectoria de mínima densidad donde desarrollará el rodal o curva Z.

- 6) A partir de la ubicación de los puntos A y Z en el Gráfico se puede evaluar la factibilidad de hacer el manejo exitosamente. Será factible si se dan conjuntamente las siguientes situaciones:
 - a. La curva A debe ser mayor que la curva Z.
 - b. La densidad inicial es superior a la curva del tamaño máximo de rama deseado.
- 7) Si su rodal no tiene factibilidad de manejo para la producción de madera de calidad, se deberán evaluar otras opciones productivas.
- 8) Para los rodales con manejo factible, calcule las diferencias entre el volumen final y el inicial, la densidad inicial y final, y el diámetro medio cuadrático inicial y el final. Marque las curvas A y Z en el diagrama. El manejo futuro se encontrará entre esas dos curvas.
- 9) Calcule el tiempo que demorará el rodal en llegar a la condición final sin intervenciones, dividiendo la diferencia entre el volumen final y el volumen inicial por el *CAP* de la situación inicial a la que se encuentra el rodal. Se espera que ese sea el tiempo máximo en que se logrará en volumen objetivo. Ese valor le dará una clara orientación acerca de la factibilidad financiera del proyecto. En este diagrama no se contempla *CAP* inferiores a $7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.
- 10) Sobre la curva A evaluada en el punto de diámetro medio cuadrático final trace una línea horizontal hasta igualar a la curva Z. A ese punto le llamaremos Y. La trayectoria de Y a Z será el último del rodal antes de lograr alcanzar el tamaño deseado con mortalidad natural.
- 11) Sobre el punto Y, trace una línea vertical hasta igualar a la curva A. A ese punto le llamaremos Y*. La diferencia entre Y* e Y es el último raleo que se realizará al rodal antes de llegar a Z. Este raleo representa una extracción sistemática de individuos. Si se desea evaluar otro tipo de raleo la línea entre Y e Y* puede tener una pendiente diferente que represente un raleo por lo bajo. La inclinación dependerá de cuán intenso sea este raleo.
- 12) Reemplace Z por Y.
- 13) Repita los puntos 10 y 11 hasta alcanzar el punto A.

Ejemplo:

Considere un rodal que tiene un estado inicial de 1.350 árboles por hectárea, un diámetro medio cuadrático de 19,5 cm y una altura dominante de 18,6 m. Se propone realizar un manejo orientado a obtener $400 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ con

un diámetro medio cuadrático de 35 cm y un diámetro de ramas inferiores a 4 cm en la troza basal.

Procedimiento de cálculo basado en lecturas aproximadas obtenidas gráficamente desde el DMD:

Volumen inicial = $222 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$

CAP del punto inicial $\sim 9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

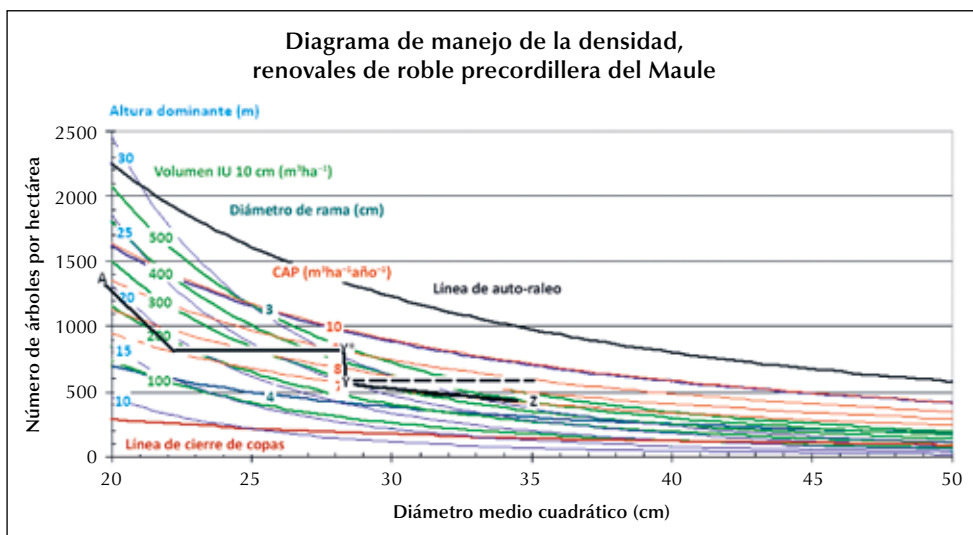
El manejo es factible debido a que la curva A (cercano a $9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) es mayor que la curva Z (cercano a $7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) y que la curva de 4 cm de diámetro de rama.

$\Delta \text{Vol} = 178 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ $\Delta D_c = 15,5 \text{ cm}$ $\Delta N_{ha} = 950$

Tiempo faltante a la rotación: 20 años.

El manejo se ilustra en el Gráfico 6.8. Su interpretación es la siguiente: La densidad inicial del rodal de 1.350 árboles puede ser bajada con un raleo por lo bajo hasta 850 árboles por hectárea y dejar un rodal remanente con un diámetro medio cuadrático de 22 cm, luego de esto el rodal no debería tener mortalidad natural hasta alcanzar la curva A con un diámetro medio cuadrático de 28 cm. En ese punto se debe realizar un nuevo raleo esta vez sistemático hasta 600 árboles por hectárea, luego el rodal debería alcanzar su tamaño final de 35 cm, 400 árboles por hectárea y $400 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$. De acuerdo con el diagrama el rodal debería tener en su estado inicial las ramas basales contenidas a un diámetro cercano a 3,3 cm y muertas de acuerdo con el Gráfico 6.3.

Gráfico 6.8. Ejemplo de uso DMD.



7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

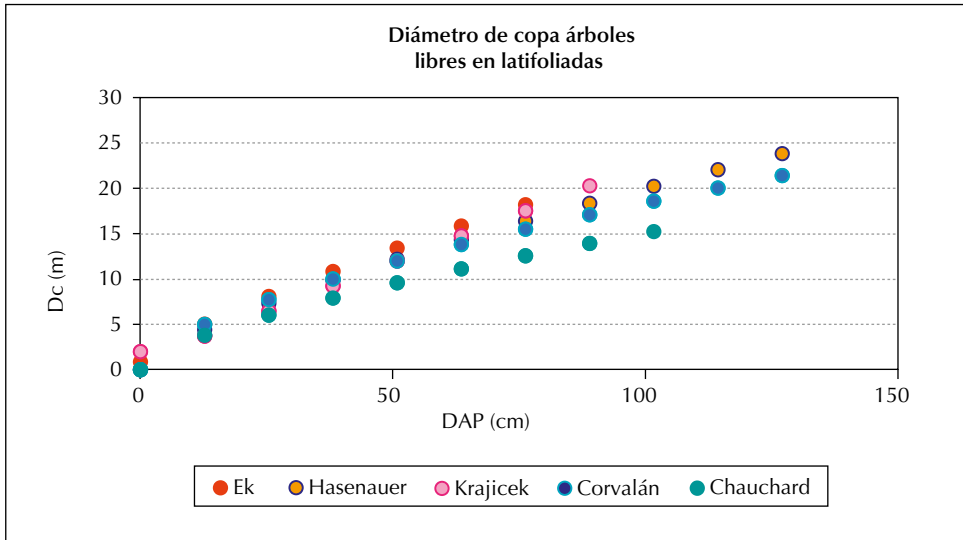
7.1. Línea de cierre de copas

Comparación de resultados con otros estudios

Para la especie roble existe solo una publicación (Chauchard *et al.*, 2001) que modelan la relación *DC* vs. *DAP* en especies del género *Nothofagus* en la provincia de Lanín, Argentina, con el que se puede comparar este estudio. Los resultados que se muestran en el Gráfico 7.1 evidencian que el *DC* estimado por Chauchard *et al.* (2001) es siempre inferior que el que se estima en este estudio (Corvalán en el Gráfico 7.1), siendo 18% menor para un *DAP* de 100 cm. Este fenómeno se puede deber a que Chauchard *et al.* (2001) construyeron un modelo con 52 árboles de roble, raulí y coigüe mezclados y en proporciones no indicadas. La tolerancia de las especies puede ser un factor de explicación (Martínez *et al.*, 2008), ya que como lo señalan Russel & Weiskittel (2011) afecta los coeficientes de la función de diámetro de copa, siendo las especies más tolerantes de mayor expansión de copa que las intolerantes (para un mismo *DAP*). Esto estaría implicando que coigüe tendría que tener menor tolerancia que roble y raulí y una mayor participación en la mezcla de especies, de acuerdo con la clasificación de tolerancia indicada por Donoso (1981). De acuerdo con Hasenauer (1997) y Krajicek *et al.* (1961), las especies de un mismo género tienen anchos de copas similares para iguales diámetros a la altura de pecho. Según Krajicek *et al.* (1961), esta relación no depende de las variaciones de sitio. Debe señalarse que las diferencias entre LCC de este estudio y el de Chauchard *et al.* (2001) son sustanciales. Para *DAP* de 35 y 55 cm, Chauchard *et al.* (2001) señalan densidades de 228 y 125 árboles por hectárea y áreas basales de 21,9 y 29,6 m²ha⁻¹, respectivamente. Esos valores son superiores en 60% en promedio a los obtenidos en este estudio, lo que se debe a la diferencia de tamaños de copa estimados.

Comparando los ajustes realizados en otras latifoliadas del hemisferio norte: *northern red oak* en Wisconsin, USA (Ek, 1974) y Austria (Hasenauer, 1997) y *hickory*, *with oak* y *black oaks* (Krajicek *et al.*, 1961) que se muestran en conjunto con este estudio y el de Chauchard *et al.* (2001) en el Gráfico 7.1, se advierte que el desarrollo de las copas para roble en Sudamérica son inferiores a las latifoliadas señaladas en Norteamérica y Europa.

Gráfico 7.1. Comparación de ecuaciones de diámetro de copa en latifoliadas.



7.2. Línea de auto-raleo

Comparación entre métodos de ajuste

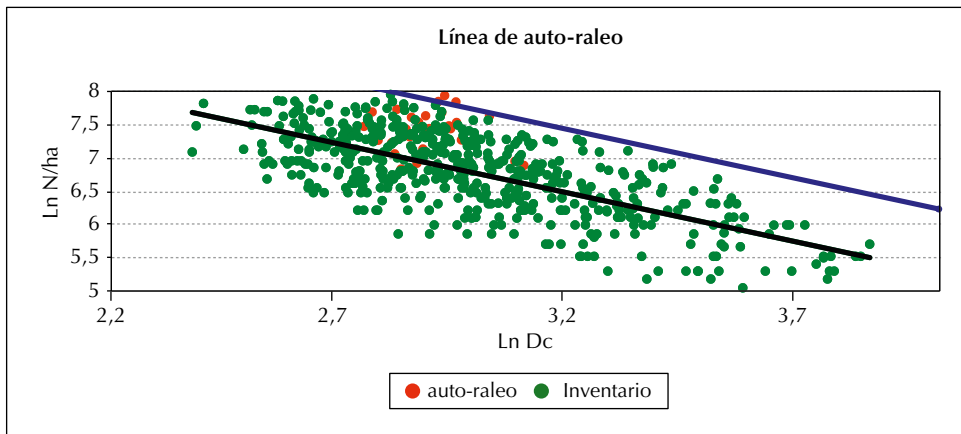
En relación con la forma de determinar los parámetros del modelo (20) de Reineke, al utilizar la información de las parcelas subjetivamente elegidas para la determinación de esta ecuación y compararla con los datos de inventarios forestales de rodales de similares características que se muestran en el Gráfico 7.2, se observa que:

- La mayor parte de las parcelas de auto-raleo, subjetivamente seleccionadas, están sobre la ecuación (25) ajustada por mínimos cuadrados ordinarios y bajo la ecuación (26) ajustada por regresión estocástica de fronteras.
- Muchas parcelas de inventario forestal presentan mayor densidad que parcelas de auto-raleo y marcan mejor la frontera de la nube de puntos.

La selección subjetiva de parcelas en estado de auto-raleo está muy cuestionado. Este ha sido ampliamente discutido por varios autores (Santiago-García *et al.*, 2013; Weiskittel *et al.*, 2009; Vanclay & Sands, 2009; Zhang *et al.*, 2005). Los resultados de este trabajo se han basado de manera fundamental en los argumentos usados por Zhang *et al.* (2005), quienes al comparar

varios métodos de ajuste en rodales coetáneos de *Pinus strobus* concluyen en que usando función estocástica de frontera se producen resultados similares a los de regresión determinística de frontera y regresión cuantil, no apartándose significativamente de los supuestos subyacentes de la distribución y cuestionan con seriedad el método de regresión por mínimos cuadrados ordinarios, ya que la pendiente de la curva es muy sensible a los datos.

Gráfico 7.2. Línea de auto-raleo ajustada por mínimos cuadrados ordinarios (línea negra) y por regresión estocástica de frontera (línea azul) junto a parcelas de inventario forestal y de auto-raleo.



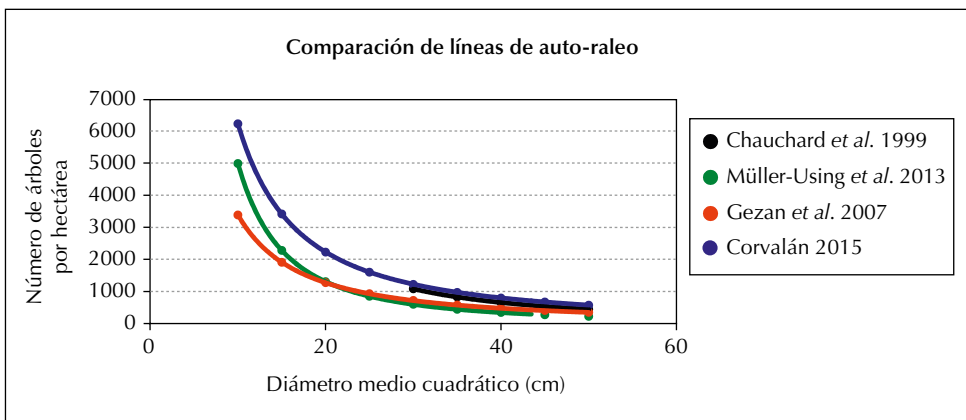
Comparación con otras líneas de auto-raleo

Tal vez el componente más importante de un DMD es la línea de auto-raleo, ya que muchos autores determinan las líneas intermedias como porcentajes fijos de ella sin realizar los ajustes pertinentes y más de alguno solo ajusta esta línea para construir el DMD completo.

Para *Nothofagus*, Gezan *et al.* (2007) y Müller-Using *et al.* (2013) construyeron la línea de auto-raleo en Chile y Chauchard *et al.* (1999) lo hicieron en Argentina. Gezan *et al.* (2007) determinaron una pendiente común para roble, raulí y coigüe con un valor de $-1,4112$. La desviación estándar que determinaron para este valor fue de $0,0496$. Asumiendo una distribución normal para este valor, este podría variar entre $-1,5104$ y $-1,312$ al 95% de confiabilidad, ello no sería diferente del resultado de este trabajo ni tampoco del valor teórico aceptado como fundamento biológico de la ley del $-3/2$ (Hutchings, 1979; Dirzo & Harper, 1980; Watkinson, 1980; White, 1981). Un resultado completamente diferente es el reportado por Müller-Using *et al.* (2013), quienes obtuvieron para roble una pendiente de $-1,93341$, la que atribuyen

a menores tasas de crecimiento debido a calidades de sitio inferiores. Esta explicación merece –como lo indican sus propios autores– una mayor revisión. Por lo demás, Chauchard *et al.* (1999) obtienen valores similares a los de Müller-Using *et al.* (2013) con pendientes que varían según el diámetro medio geométrico del rodal y la técnica de ajuste empleado. También sugieren estudiar el impacto del sitio en la determinación de esta pendiente. En relación con la constante de la ecuación de Reineke, Gezan *et al.* (2007) determinaron para roble un valor de 11,3770, este podría variar entre 11,6666 y 11,0874, al considerar la desviación estándar (0,1448) y un supuesto de normalidad con un nivel de confiabilidad de 95%. Este valor sería significativamente diferente del obtenido por este estudio (12,1501), pero con valores cercanos. Si se compara este último con el de Müller-Using *et al.* (2013), que fue de 12,9675 con una desviación estándar de 0,299705, resultarían no significativamente diferentes con 95% de confiabilidad. Comparando la constante del presente estudio con los de Chauchard *et al.* (1999) que obtuvieron valores entre 12,5213 y 12,9013 resultarían en valores similares, aun cuando no publican la desviación estándar. Considerando que la línea de auto-raleo debe contemplar en conjunto la pendiente y la constante de la función de Reineke, se presenta a continuación un gráfico comparativo de las diferentes líneas de auto-raleo de acuerdo con diferentes autores.

Gráfico 7.3. Trayectoria de densidad máxima según varios autores.



En resumen, a pesar de que los coeficientes resultan bastante diferentes, se aprecia que la línea de auto-raleo propuesta en este estudio resulta similar a la de Chauchard *et al.* (1999) para diámetros medios cuadráticos superiores a 30 cm y muy diferente de las ecuaciones de Gezan *et al.* (2007)

y Müller-Using *et al.* (2013), que resultan muy similares entre sí. Tal vez la mayor implicancia para el uso del DMD es que la capacidad de carga que muestra el presente trabajo para roble resulta muy superior a los indicados por Gezan *et al.* (2007) y Müller-Using *et al.* (2013), que son los únicos construidos para esta especie en Chile. Debe hacerse notar sin embargo que se trata de zonas geográficas diferentes. El Gráfico 7.3 sugiere un cierto orden en el sentido que los rodales de la VII Región (este trabajo) tienen mayor capacidad de carga que los del Biobío (Müller-Using *et al.* (2013)) y estos que los más australes (Gezan *et al.* (2007)).

7.3. Línea de control del tamaño de ramas

El diámetro de las ramas es un tema muy estudiado especialmente en coníferas comerciales y se ha demostrado en distintas especies que está fuertemente ligado a condiciones de sitio, densidad y en menor medida a control genético. Para *Pseudotsuga menziesii*, Briggs *et al.* (2007) muestran que en una plantación el diámetro medio de las ramas basales está de modo considerable correlacionado con la densidad de la plantación inicial y con el diseño de espaciamientos. Lowell *et al.* (2014) destacan que en esta especie el diámetro de las ramas está mucho más afectado por el régimen de densidad que por el control genético. En latifoliadas, Mäkinen (2002) estableció que el mayor espaciamiento en una plantación retrasa la reducción del crecimiento y aumenta la longevidad de las ramas de *Betula pendula* en Finlandia. Además, Garber & Maguire (2005) establecieron que los perfiles verticales de diámetros máximos en rodales mixtos en coníferas aumentan con el espaciamiento. Estos resultados son concordantes con los de este estudio que muestran una significativa relación de la altura donde se ubican diámetros fijos máximos (1 a 4 cm) con la densidad del rodal, lo que es equivalente a indicar que el aumento en la densidad de rodal desplaza la copa viva hacia posiciones superiores.

Groot & Schneider (2011) determinaron que las especies de hoja ancha tienen un diámetro máximo de ramas mucho mayor (7-14 cm) que las de coníferas (1-5,2 cm) en una muestra de 1.018 árboles de nueve especies muestreadas en Canadá. Los valores de diámetros máximos en el perfil vertical reportados por Garber & Maguire (2005) son coincidentes con estos valores aun en rodales con densidades muy bajas. Briggs *et al.* (2007) encontraron que los tamaños de ramas máximas en la troza basal de 5 m en *Pseudotsuga*

menziesii varían entre 39,2 mm y 25,6 mm para rodales que se encuentra con densidades entre 480 y 1.680 árboles por hectárea, respectivamente. Estos valores son considerados en rangos medio a grande para la especie (Bowers, 1997). Sonderman (1984) reporta diámetros de rama en trozas basales en promedio de 30 mm en *Quercus* en Kentucky. Comparando estos valores referenciales con los de este trabajo, se advierte que el roble alcanza tamaños de rama máximos mucho mayores en promedio que los referidos, alcanzando valores medios de 106 mm con extremos de 45 y 229 mm.

La estructura vertical y la forma de distribución de las ramas de roble son concordantes con la mayoría de los trabajos reportados, presentando un tamaño creciente en altura alcanzando su máximo cercano al 50%, similar a los resultados reportados por Colin & Houllier (1991) en *norway spruce*, a Vestøl & Høibø (2000) entre 30 y 60% en *Picea abies*, dependiendo del sitio y a Garber & Maguire (2005) lo ubican entre el 10 y 40% en bosques mixtos.

Los resultados de este estudio difieren con lo señalado por Donoso (1988), quien afirma que los renovales de *Nothofagus* que crecen en una zona cercana a la realizada en este estudio tienen buena poda natural al alcanzar el 50% de la altura total de todos los árboles. El porcentaje de árboles con fuste libre de ramas en este estudio encontró su máximo en el primer decil de altura declinando hasta desaparecer a partir del quinto. La mortalidad de las ramas y el proceso de oclusión es un asunto no estudiado en la especie. Los resultados preliminares que se reportan en este estudio indican que la duración de la caída de ramas muertas en promedio alcanza 8,5 años.

El efecto del raleo y la poda sobre el tamaño de ramas es también un tema bastante estudiado. En *Pseudotsuga menziesii*, Lowell *et al.* (2014) señalan que, luego de aplicar raleos intensivos, el tamaño máximo de rama aumenta en la base de la copa viva. Este efecto es temporal hasta que las ramas se entrecruzan nuevamente y la copa se desplaza a una altura superior, situación que se repite en raleos sucesivos. Similar resultado señalan Lewis & Ferguson (1993), quienes indican que al aplicar podas combinadas con raleos en plantaciones de *Pinus radiata* el aumento en área de las primeras ramas puede alcanzar un crecimiento superior en 74% y 66% en los dos primeros años respecto de sus crecimientos anteriores. Sonderman (1987) muestra los efectos de un raleo en bosques mixtos de latifoliadas en Ohio, en que junto con aumentar el *DAP*, la altura de los árboles y la razón de copa, también aumenta la desclasificación de la madera por el aumento en el tamaño de las ramas en las dos primeras trozas de 8 pies basales por el aumento del espaciamiento. Estos resultados advierten respecto del posible efecto negativo que

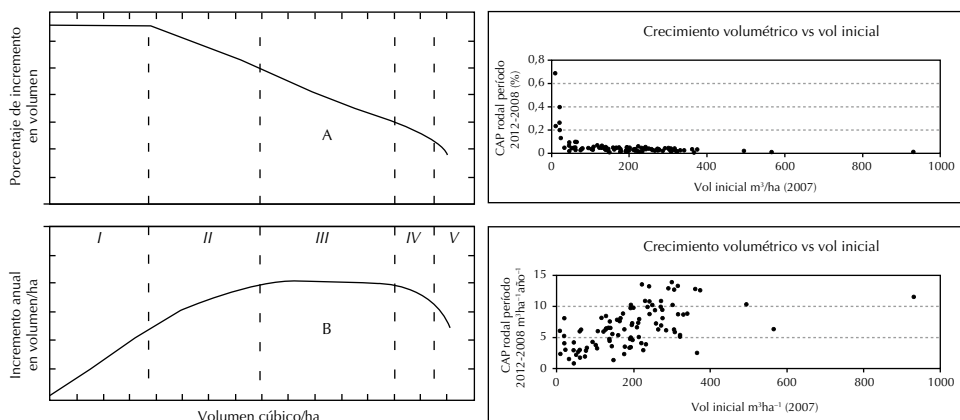
tendría un cambio en la densidad del rodal al aumentar la luminosidad de las ramas inferiores y su consecuente aumento de crecimiento, lo que originaría un deterioro en la calidad de la madera (Uri, 1998).

7.4. Línea de inicio de mortalidad por competencia

Los resultados de este estudio difieren de los clásicos señalados en la construcción de los DMD.

Para ilustrar el caso, considérese los siguientes gráficos comparativos:

Figura 7.1. Comparación entre zonas de crecimiento Langsaeter y este estudio.



Fuente: Daniel *et al.*, 1982.

La Figura 7.1 (izquierda abajo) señala las cuatro fases de crecimiento teóricas que describe una plantación coetánea a medida que se forma el rodal donde los árboles se desarrollan con un amplio espaciamiento inicial hasta lograr usar completamente los recursos disponibles y llegar finalmente a una declinación por exceso de competencia. A la derecha (abajo) se observa el CAP de los rodales de roble medidos en este estudio donde se desarrolla un crecimiento relativamente lineal en su fase inicial hasta los $300 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, aproximadamente, luego de ello parece existir una fase de crecimiento relativamente constante que perdura hasta alcanzar volúmenes bastante grandes. La falta de información del crecimiento en los rodales sobre $400 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ no permite definir esta tendencia con mayor claridad, sin embargo se asemeja bastante a la curva de Langsaeter (izquierda). En forma análoga, el porcentaje de crecimiento del rodal expresado en la Figura 7.1

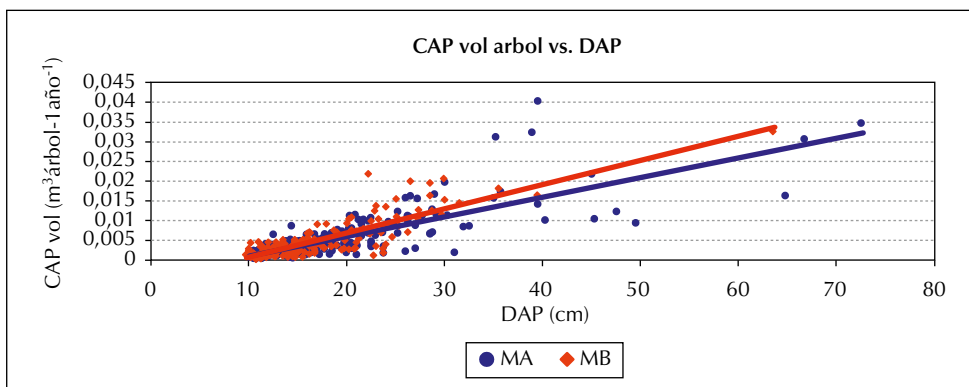
(arriba izquierda) es relativamente constante en su fase inicial, pero declina en forma permanente a partir de la creciente competencia de los rodales. A la derecha (arriba) se indica el crecimiento porcentual del volumen en la muestra de este estudio, donde se advierte claramente y desde el inicio un crecimiento declinante hasta $75 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, luego de ello se estabiliza con una leve declinación permanente.

Las posibles causas de esta diferencia pueden estar en la estructura y origen de los rodales. Los renovales de roble se han formado por el rebrote de las cepas (tocones) de los árboles del bosque original que han sido cortados y si bien son relativamente coetáneos tienen una estructura de monte medio irregular, donde se mezclan vástagos y árboles nuevos. Las tasas de crecimiento inicial del renewal son mayores que las de una plantación por aprovechar el sistema radicular formado y por la pronta ocupación del espacio (Bond & Midgley, 2001). La ocupación del espacio de crecimiento parece ser diferente, al tener el renewal una alta densidad inicial en comparación con una plantación de baja densidad. Todo lo anterior puede explicar la diferencia entre este trabajo y los DMD construidos para plantaciones.

Para validar los argumentos anteriores se modeló linealmente el crecimiento anual periódico de árboles clasificados en terreno según su origen como provenientes de semilla o "monte alto" y rebrote o "monte bajo" en función del *DAP* a fines del período con el objeto de contrastar la tendencia de ambos. El resultado se presenta en el Gráfico 7.4.

De la observación se deduce que los árboles de monte alto tienen una tendencia a presentar inferiores tasas de crecimiento que los árboles de monte bajo para iguales tamaños de *DAP*. Este fenómeno es explicado en gran parte

Gráfico 7.4. Crecimiento anual periódico de árboles según origen.



por el aprovechamiento que los vástagos hacen del sistema radicular ya formado en relación con los árboles de semilla, y probablemente por la mejor posición que alcanzan en el dosel debido a su mayor velocidad de crecimiento inicial. Otra posible explicación es la estrategia reproductiva de la especie en su permanente adaptación al estrés hídrico y a los incendios (Clarke & Knox, 2009; Bond & Midgley, 2001). También se evaluó el coeficiente de asimetría de la distribución diamétrica de las parcelas, encontrándose que solo el 8% de ellas presentó asimetría negativa y el 92% restante valores positivos, con un valor promedio de 1,03, valor propio de distribuciones del tipo "J" inversa (Sarkkola *et al.*, 2004). Muchas de estas parcelas presentan valores positivos muy altos, indicativos de encontrarse en condiciones de auto-raleo, coincidente con las usadas en este trabajo (Mohler *et al.*, 1978; Knox *et al.*, 1989).

Gezan *et al.* (2007) y Müller-Using *et al.* (2013) fijaron la línea de inminente mortalidad por competencia en 60% de densidad relativa. Los autores señalan ese límite asumiendo que en él ocurre el fenómeno de alta probabilidad de muerte por exceso de competencia. Gezan *et al.* (2007) señalan que para determinar la línea de inminente mortalidad por competencia se debe disponer de ensayos de raleo con parcelas permanentes para registrar la densidad en donde posteriormente los rodales raleados entran a la inminente mortalidad por competencia. Müller-Using *et al.* (2013), igual que Gezan *et al.* (2007), utilizan el 60% usando como referencia los trabajos de Drew y Flewelling (1977) y otros autores.

7.5. Isolíneas de volumen y diámetro medio cuadrático

Las isolíneas construidas tienen coeficientes altamente significativos, ello expresa la buena selección de las variables utilizadas. La ecuación que relaciona el diámetro medio cuadrático con el número de árboles por hectárea y la altura dominante tiene un coeficiente de correlación múltiple que resulta bastante inferior al ajustado por Valbuena *et al.* (2008), que es el único trabajo con el que se puede comparar metodológicamente. Esa diferencia en parte se debe a la estructura regular de los rodales de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, a la gran cantidad de información utilizada en su construcción, a la menor densidad de los rodales y a la naturaleza aleatoria de los datos. En este estudio las parcelas han sido seleccionadas con el objeto de cubrir todas las variaciones de densidad y estructura para construir el DMD, incluyendo en algunas parcelas incluso árboles de generaciones anteriores. En cuanto a

la isólineas de volumen, esta presenta coeficientes de correlación múltiple incluso superiores a los de Valbuena *et al.* (2008).

7.6. Diagrama de manejo de la densidad

El diagrama de manejo de la densidad construido para roble difiere de los diagramas construidos para plantaciones coetáneas. En particular, este estudio muestra que el crecimiento anual periódico en roble no decrece bajo la línea de auto-raleo y se puede deber a la estructura y origen de los rodales.

Las parcelas temporales usadas en este estudio no permiten establecer una correspondencia entre mortalidad natural y crecimiento como el señalado por Langsaeter y discutido por Newton (1997) y otros autores, por lo que no es posible utilizar el concepto de línea de inminente mortalidad por competencia en el diagrama de manejo de la densidad referido en otros estudios. Aquí se utiliza el concepto de trayectoria de máxima y mínima densidad entre las que se desarrollará el rodal y corresponden a las probables trayectorias tamaño-densidad entre la condición inicial del rodal y la condición final, respectivamente.

Debido a que la trayectoria tamaño-densidad no ha sido establecida se asume que un rodal mantiene una proporción de árboles vivos relativamente constante en relación con la línea de auto-raleo durante todo su desarrollo dada la estructura irregular de los rodales. Este argumento resulta razonable al considerar que es difícil aumentar la ocupación del sitio con ese tipo de estructuras y distribución agrupada de plantas. La línea de cierre de copas se ubica entre 11 y 16% de la línea de auto-raleo siguiendo en la práctica una línea paralela a la de auto-raleo, como ocurre en los diagramas tradicionales.

Los resultados obtenidos en este estudio son muy difíciles de comparar con otros trabajos por las razones señaladas.

Tanto el crecimiento neto medido como la altura sobre el suelo donde se ubican los tamaños de rama objetivo a controlar presentan alta correlación con la densidad relativa del rodal, lo que permite usarla como predictor en el DMD.

Las principales limitaciones de este diagrama de manejo de la densidad están en su carácter estático y en la falta de información acerca de la mortalidad de los rodales al evolucionar.

A causa de las altas correlaciones encontradas en este estudio entre los parámetros de rodal y del árbol es perfectamente posible mejorar los estimadores

tanto del tamaño de ramas como de las tasas de crecimiento del rodal, siempre y cuando se incorpore información dinámica y se establezcan las trayectorias tamaño-densidad.

8. CONCLUSIONES

Acerca del tamaño de las ramas en roble y sus opciones de control mediante la densidad:

- La altura en el fuste sobre el nivel de suelo donde se ubican ramas de diámetros fijos de 1, 2, 3 y 4 cm está significativa y positivamente correlacionada con la densidad relativa del rodal y se encuentran en promedio a 1,3; 2,3; 3,3 y 4,3 metros de altura.
- No es posible controlar en una troza basal el diámetro de las ramas a tamaños de 1 y 2 cm con el manejo de la densidad y solo se puede conseguir con poda artificial. Para no exceder de 3 y 4 cm de diámetros de ramas en esa misma troza debe mantenerse el rodal en niveles de densidad relativa de 72% y 31%, respectivamente.
- La distribución del diámetro de las ramas de mayor tamaño en el perfil vertical del árbol tiene una forma de polinomio de tercer orden alcanzando su valor máximo en promedio a 10,6 cm a 8,5 m de altura, esto dificulta seriamente las opciones para producir madera libre de nudos en una segunda troza basal al ser crecientes en altura.
- El diámetro del cilindro nudoso vivo y muerto está linealmente correlacionado con el *DAP* de los árboles y presenta una diferencia en diámetro de entre 3 y 5 cm para rangos de *DAP* entre 15 y 40 cm, respectivamente. Esta diferencia representa la cota mínima para el diámetro de oclusión de las ramas caídas. La madera libre de nudo en una troza basal recién se empieza a formar cuando el árbol alcanza un *DAP* de 25 cm.
- El tamaño máximo de rama en el árbol no se correlaciona con ningún parámetro de rodal pudiendo estar bajo control genético, observándose en terreno una alta presencia de ramas del tipo prolépticas.
- Las ramas muertas alcanzan en promedio hasta el 60% de la altura total, teniendo su máxima presencia alrededor del 30% y pueden permanecer en promedio en pie hasta 8,5 años desde su muerte hasta la caída. El roble no se puede considerar una especie de buena poda natural, ya que se encontró ramas muertas durante 28 años.
- Por todo lo anterior, es altamente conveniente considerar la realización de poda artificial si se pretende conseguir una troza basal de buena calidad.

Respecto del diagrama de manejo de la densidad:

- La línea de cierre de copas o de plena ocupación del espacio se sitúa entre 11 y 16% respecto de la línea de auto-raleo y el mejor modelo de ajuste para el diámetro de la copa como función del *DAP* es el paraboloides hiperbólico propuesto en este trabajo.
- Los diámetros de copa de este estudio resultan superiores a los determinados por Chauchard *et al.* (2001) para igual *DAP* en aproximadamente 18%, resultando este último en una densidad superior en 60% al de este estudio en la línea de cierre de copas.
- La línea de auto-raleo se determinó mediante el método de regresión estocástica de frontera utilizando datos de inventario forestal en su construcción. Este método resulta objetivo al compararlo con el de selección y ajuste de parcelas subjetivamente elegidas para su construcción. En este trabajo se constata que los renovales de roble siguen la ley del $-3/2$ o ley de auto-raleo.
- La línea de auto-raleo construida en este trabajo resulta similar a la construida por Chauchard *et al.* (1999) para diámetros medios cuadráticos superiores a 30 cm, pero muy diferentes y con mayor capacidad de carga que los determinados por Gezan *et al.* (2007) y Müller-Using *et al.* (2013).
- Los renovales de roble aunque coetáneos y relativamente puros no siguen estrictamente la teoría de Langsaeter en su formación y desarrollo, difiriendo con otros diagramas de manejo de la densidad.
- Los renovales de roble alcanzan su máximo crecimiento anual periódico con la mayor densidad posible dando cuenta de una estrategia de crecimiento propia de estructuras de monte bajo irregular y adaptado a climas secos. La tasa de crecimiento de los rebrotes supera a la de los árboles de semilla para iguales *DAP* y la estructura de los rodales presenta la asimetría propia de las distribuciones diamétricas tipo "J" inversa.
- En este trabajo, y por la naturaleza de los datos, no se utilizó la línea de inicio de mortalidad por competencia tradicional para limitar la extracción de los raleos y en su reemplazo se utilizó en concepto de zona de crecimiento mínimo. En los diagramas de manejo de la densidad tradicional se intenta controlar la mortalidad y en este trabajo se intenta controlar la tasa de crecimiento.
- El uso del diagrama propone hacer los cambios en densidad mínimos requeridos para realizar el tránsito de un rodal desde un estado inicial a uno final conteniendo el tamaño de las ramas basales y controlando la tasa de crecimiento del rodal.

- Integrando todos los componentes del diagrama, se concluye que los renovales logran sus mejores tasas de crecimiento y controlan el tamaño de las ramas basales con altas densidades relativas. Por ello, la advertencia general es realizar una silvicultura con intervenciones suaves. Grandes aperturas de dosel pueden generar pérdidas de crecimiento, desarrollo de ramas, inestabilidad del rodal y otros efectos adversos que resultan imposibles de cuantificar con este estudio.
- El uso del diagrama es solamente indicativo, ya que se ha construido con parcelas temporales y descansa en el supuesto que los cambios que produzcan las intervenciones en densidad generarán respuestas parecidas a las que naturalmente se producen.
- Este diagrama tiene altas posibilidades de ser transformado en un modelo dinámico si se integran datos de parcelas permanentes para la construcción de las líneas tamaño-densidad faltantes.
- Las decisiones de manejo que se deriven del uso del diagrama deben ser complementadas con un análisis financiero de las actividades que incorporen los costos y beneficios asociados a la producción de madera libre de nudos o de nudos vivos de tamaño controlado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aigner, D.; Lovell, K. & Schmidt, P. 1997. Formulation and estimation of stochastic frontier production function model. *J. Econometrics*. 6:21-37.
- Álvarez-González, J.; Ruiz González, A.; Rodríguez-Soalleiro, R. & Barrio-Anta, M. 2005. Ecoregional-based stand density management diagrams for *Pinus pinaster* L. in Galicia (northwest Spain). *Annals of Forest Science*. 62:115-127.
- Archibald, D. & Bowling, C. 1995. Jack pine density management diagram for boreal Ontario. OMNR, Northeast and Northwest Science and Technology. TN-005 (NWST TN-31).
- Atmósfera. 2014. Información climatológica de estaciones chilenas. Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Disponible en: <http://www.atmosfera.cl/HTML/datos/datos_02.html> Visitado el 12 de mayo de 2014.
- Bond, W. & Midgley, J. 2001. Ecology of sprouting in woody plants: the persistence niche. *Trends in ecology & evolution*. 16(1):45-51.
- Bowers, S. 1997. Key to Douglas fir log grades. Ext. Serv., Oregon State Univ., Corvallis, Oregon. 16 pp.
- Bravo, F.; Montero, G. & Del Río, M. 1997. Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología*. 11:177-187.
- Briggs, D.; Ingaramo, L. & Turnblom, E. 2007. Number and diameter of breast-height region branches in a Douglas-fir spacing trial and linkage to log quality. *Forest products journal*. 57(9):28.
- Cameron, I. 1988. An evaluation of the density management diagram for coastal Douglas-fir. Canadian Forestry Service, Victoria B. C.
- Castedo, F.; Crecente, F.; Álvarez, P. & Barrio, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiate pine stands including assessment of stand stability. *Forestry*. 82(1).
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile, Región del Maule. Santiago de Chile. Servicio Agrícola y Ganadero, Instituto de Desarrollo Agropecuario, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Corporación Nacional Forestal. 45 p.

- Chauchard, L.; Sbrancia, R.; González, M.; Maresca, L. & Rabino, A. 1999. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$ o ley del autorraleo. *Bosque*. 20:79-94.
- Chauchard, L.; Sbrancia, R.; González, M.; Maresca, L.; Rabino, A. & Mazzuchelli, M. 2001. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: II. Línea de inicio de competencia y diagramas de manejo de la densidad. *Bosque*. 22:3-10.
- Clarke, P. & Knox, K. 2009. Trade-offs in resource allocation that favour resprouting affect the competitive ability of woody seedlings in grassy communities. *Journal of ecology*. 97(6):1374-1382.
- Colin, F. & Houllier, F. 1991. Branchiness of Norway spruce in north-eastern France: modelling vertical trends in maximum nodal branch size. In *Annales des sciences forestières*. 48(6):679-693.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 1999. Documento de trabajo N° 298 plan de manejo Reserva Nacional Los Bellotos del Melado. Unidad de Gestión Patrimonio Silvestre. 71p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2011. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo y actualización. Disponible en: http://sit.conaf.cl/tmp/obj_774279/268_Actualizacion_Maule_Biobio.pdf. Visitado el 27 julio de 2015.
- Corvalán, P. 1992. Estudio de la poda. Efecto de la edad, exposición y estación del año, en el comportamiento de la oclusión de árboles podados de *Pinus radiata* D. Don. Informe interno Forestal Celco S.A.
- Corvalán, P. & Hernández, J. 2007. Mediciones Forestales, Dendrometría. En: *Biodiversidad: Manejo y Conservación de Recursos Forestales*. Hernández, J. De la Maza, C. L. & Estades, C. (Eds.). Editorial Universitaria. 169-222.
- Corvalán, P.; Galleguillos, M. & Hernández, J. 2014. Presencia, abundancia y asociatividad de *Citronella mucronata* en bosques secundarios de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*. 35(3):269-278.
- Cown, D.; Marshall, H.; Silcock, P. & Meason, D. 2013. Sawn timber grade recovery from a planted coast redwood stand growing in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 43(1):8.
- Daniel, T.; Helms, J. & Baker, F. 1982. *Principles of Silviculture*. Second Edition. McGraw-Hill. New York, USA. 500 p.
- Dean, TH. & Baldwin, C. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. Research Paper SO-275. Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Louisiana. USDA.

- Dirección General de Aguas (DGA). 2014. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas. Disponible en: <<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>> Visitado el 15 de mayo de 2014.
- Dirzo, R. & Harper, J. 1980. Experimental studies on slug-plant interactions: II. The effect of grazing by slugs on high density monocultures of *Capsella bursa-pastoris* and *Poa annua*. *The Journal of Ecology*. 999-1011.
- Donoso C. 1981. Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente. Editorial Universitaria.
- Donoso, C. 1982. Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque*. 4(2):117-146.
- Donoso, P. 1988. Caracterización y proposiciones silviculturales para renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en el área de protección "Radal Siete Tazas". *Bosque*, 9(2) 103-114.
- Donoso, C. 1995. Bosques templados de Chile y Argentina: Variación, estructura y dinámica. Tercera Edición. Santiago, Editorial Universitaria. 477 p.
- Donoso, C. 2007. Los bosques de Chile en el contexto mundial: importancia y valor. *Bosque Nativo*. 41:14-15.
- Donoso, P.; Soto, D. & Bertín, R. A. 2007. Size-density relationships in *Drimys winteri* secondary forests of the Chiloe Island, Chile: Effects of physiography and species composition. *Forest Ecology and Management*, 239 (1), 120-127.
- Drew, T. & Flewelling, J. 1977. Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterrey pine plantations. *Forest Science*, 23(4): 517-534.
- Drew, T. & Flewelling, J. 1979. Stand density management: An alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *Forest Science*. 25: 518-532.
- Ek, A. 1974, Dimensional relationships of forest and open grown trees in Wisconsin. School of Natural Resources, University of Wisconsin, Madison, WI. Forestry Research Notes. 7 p.
- Farnden, C. 1996. Stand density management diagrams for lodgepole pine, white spruce and interior Douglas-fir. Pacific Forestry Centre. Information Report BC-X-360. Canadian Forest Service, Victoria, British Columbia. Canada.
- Foli, E.; Alder, D.; Miller, H. & Swaine, M. 2003. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management*. 173: 79-88.
- Furnival, G. & Wilson, R. 1971. Systems of equations for predicting forest growth and yield. In: Patil, GP.; Pielou, RC. & Waters, WE. eds. *Statistical*

- Ecology. Vol. III, Many species, populations, ecosystems and system analysis. p. 43-57.
- Garber, S. & Maguire, D. 2005. Vertical trends in maximum branch diameter in two mixed-species spacing trials in the central Oregon Cascades. *Canadian journal of forest research*. 35(2):295-307.
- Gezan, S.; Ortega, A. & Andenmatten, E. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque (Valdivia)*. 28(2):97-105.
- Gingrich, S. 1967. Measuring and evaluation stocking and stand density in upland hardwoods forests in the Central States. *For. Sci.* 13:38-53.
- Groot, A. & Schneider, R. 2011. Predicting maximum branch diameter from crown dimensions, stand characteristics and tree species. *The Forestry Chronicle*. 87(4).
- Haig, I.; Teesdale, L.; Briegleb, PH.; Payne, B. & Haertlel, M. 1946. *Forest resources of Chile*. 256 p.
- Hasenauer, H. 1997. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. *For. Ecol. Manag.* 96(3):197-206.
- Henningsen, A. & Hamann, J. 2007. Systemfit: A package for estimating systems of simultaneous equations in R. *Journal of Statistical Software*. 23(4):1-40.
- Husch, B.; Beers, T, & Kershaw, J. 2003. *Forest Mensuration*. 4th Edition. J. Wiley & Sons. N.J. 443 p.
- Hutchings, M. 1979. Weight-density relationships in ramet populations of clonal perennial herbs, with special reference to the-3/2 power law. *The Journal of Ecology*. 21-33.
- Instituto Forestal (INFOR). 2011. Bosque nativo: evaluación y análisis de los métodos de regeneración aplicados en el tipo forestal roble-raulí-coigüe de la precordillera de los Andes de la región del Maule, estado de los bosques residuales. Disponible en: <http://transparencia.minagri.cl/descargas/2011/medios/INFOR/BOSQUE_RESIDUAL_RO-RA-CO.pdf>. Visitado el 14 de mayo 2015.
- Instituto Forestal (INFOR). 2012. La industria del aserrío del bosque nativo. Boletín N° 4. Disponible en: <http://transparencia.minagri.cl/descargas/2011/medios/INFOR/BOSQUE_RESIDUAL_RO-RA-CO.pdf>. Visitado el 14 de mayo 2015.
- Kamara, M.; Deshar, R.; Sharma, S.; Kamruzzaman, MD. & Hagihara, A. 2012. The self-thinning exponent in overcrowded stands of the mangrove, *Kandelia obovata*, on Okinawa Island, Japan. *J. Oceanogr.* (68): 851-856.

- Kershaw, J. & Fischer, B. 1991. A stand density management diagram for sawtimber-sized mixed upland central hardwoods. In: "The 8th Annual Central Hardwoods Conference", L. H. McCormick and K. W. Gottschalk eds. USDA, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report, NE-148, pp. 414-428.
- Knox, R.; Peet, R. & Christensen, N. 1989. Population dynamics in loblolly pine stands: changes in skewness and size inequality. *Ecology*. 1153-1166.
- Kozlowski, T. & Pallardy, S. 1997. Growth control in woody plants. Elsevier.
- Krajicek, J. & Brinkman, K. 1957. Crown Development: An Index of Stand Density. Central States Forest Experiment Station, U. S. Department of Agriculture.
- Krajicek, J.; Brinkman, K. & Gingrich, S. 1961. Crown competition-a measure of density. *For. Scie.* 7:35-42.
- Lavery, P. 1986. Plantation Forestry with *Pinus radiata*. Review papers. Paper N° 12. School of Forestry. University of Canterbury, Christchurch. New Zealand. 255 p.
- Lewis, N. & Ferguson, I. 1993. Management of Radiata Pine. Melbourne: Innata Press.
- Long, J. 2010. Stand management diagrams. UHTA STATE UNIVERSITY. Visitado el 25 de Febrero 2013. <<https://spaces.usu.edu/display/SILVI/Stand+management+diagrams>>
- Lowell, E.; Maguire, D.; Briggs, D.; Turnblom, E.; Jayawickrama, K. & Bryce, J. 2014. Effects of Silviculture and Genetics on Branch/Knot Attributes of Coastal Pacific Northwest Douglas-Fir and Implications for Wood Quality-A Synthesis. *Forests*. 5(7):1717-1736.
- Maguire, D. & Hann, D. 1987. A stem dissection technique for dating branch mortality and reconstruction past crown recession. *For. Sci.* 33:858-871.
- Mäkinen, H. 2002. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. *Trees*. 16:346-353.
- Martínez, J.; Meave, J. & Bongers, F. 2008. Light-related variation in sapling architecture of three shade-tolerant tree species of the Mexican rain forest. *Revista Chilena de Historia Natural*. 81:361-371.
- Mitchell, S. 2000. Forest health: preliminary interpretations for wind damage. Forest Practice Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, B.C. Stand Density Management Diagrams.
- Mohler, C.; Marks, P. & Sprugel, D. 1978. Stand structure and allometry of trees during self-thinning of pure stands. *The Journal of Ecology*. 599-614.

- Müller-Using, B.; Rodríguez, R. & Gajardo, P. 2013. Desarrollo de una guía de manejo de la densidad en bosques de segundo crecimiento de roble (*Nothofagus obliqua*) en la región del Biobío. *Bosque* (Valdivia). 34(2):201-209.
- Nagai, H.; Murata, K & Nakano, T. 2009. Defect detection in lumber including knots using bending deflection curve: comparison between experimental analysis and finite element modeling. *Journal of wood science*. 55(3):169-174.
- Navarro, C.; Herrera, M; Drake, F. & Donoso, P. 2011. Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. *Bosque*. 32(2):175-186.
- Neilsen, W. & Gerrand, A. 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection. *Forest Ecology and Management*. 123:217-229.
- Newton, P. & Weetman, G. 1994. Stand density management diagram for managed black spruce stands. *Forestry Chronicle*. 70:65-74.
- Newton, P. 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management*. 98:251-265.
- Pinto, I.; Pereira, H. & Usenius, A. 2003. Analysis of log shape and internal knots in twenty Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems based on visual scanning and computer aided reconstruction. *Annals of forest science*. 60(2):137-144.
- Powelson, A. & Martin, P. 2001. Spacing to increase diversity within stands. Forest Practice Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, B.C. Stand Density Management Diagrams.
- R Development Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Reineke, L. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, Washington, D. C. Vol. 46, N° 7.
- Roach, B. 1997. A Stocking Guide for Allegheny Hardwoods and Its Use in Controlling Intermediate Cuttings. USDA For. Serv. Northeast For. Exp. Sta. Res. Pap. Ne-373.30 p.
- Russell, M. & Weiskittel, A. 2011. Maximum and Largest Crown Width Equations for 15 Tree Species in Maine. *North J. Appl. For.* 28(2).
- Salas, C.; Ene, L.; Gregoire, T.G.; Naesset, E. & Gobakken, T. 2010. Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models. *Remote Sensing of Environment*. 114(6):1277-1285.

- Santiago-García, W.; De los Santos-Posadas, H.; Ángeles-Pérez, G.; Valdez-Lazalde, J.; Valle-Paniagua, D. & Corral-Rivas, J. 2013. Autoaclareo y guías de densidad para *Pinus patula* mediante el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia*. 47(1):75-89.
- Sarkkola, S.; Hokka, H. & Penttila, T. 2004. Natural development of stand structure in peatland Scots pine following drainage: results based on long-term monitoring of permanent sample plots. *Silva Fennica*. 38(4):405-412.
- Schnur, L. 1937. Yield, stand, and volume tables for even-aged upland oak forests (Vol. 560, p. 87). Washington, DC: US Department of Agriculture.
- Sonderman, D. 1984. Quality response of even-aged 80-year-old white oak trees after thinning. Northeastern Forest Experiment Station, Research Paper N E-543. Forest Service, United States Department of Agriculture.
- Sonderman, D. 1985. Stand-density-A factor Affecting Stem Quality of Young Hardwoods. Research Paper NE-561. Forest Service. USDA.
- Sonderman, D. 1987. Stem-quality changes on young, mixed upland hardwoods after crop-tree release. Forest Experiment Station, NE-RP-597. Forest Service, United States Department of Agriculture.
- Souter, R.; De la Maza, E. & Enmanuelli, P. 2003. Normas de calidad de productos madereros del bosque nativo. Proyecto conservación y manejo sustentable del bosque nativo. CONAF-KFW-DED-GTZ.
- Smith, N. 1989. A stand-density control diagram for western red cedar, *Thuja plicata*. *Forest Ecology and Management*. 27:235-244.
- Smith, W.; Farrar, R.; Murphy, P.; Yeiser, J.; Meldahl, R. & Kush, J. 1992. Crown and basal area relationships of open-grown southern pines for modeling competition and growth. *Canadian Journal of Forest Research*. 22(3):341-347.
- Smith, D.; Larson, B.; Kelty, M. & Ashton, P. 1997. *The Practice of silviculture: Applied forest ecology*. Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 537 p.
- Straub, A. & Hothorn, T. 2014. SFA: Stochastic Frontier Analysis. R package version 1.0-1.
- Sturtevant, B.; Bissonette, J. & Long, J. 1996. Temporal and spatial dynamics of boreal forest structure in western Newfoundland: Silvicultural implications for marten habitat management. *Forest Ecology and Management*. 87:13-25.
- Uri, V. 1998. The effect of thinning on the branch diameter increment in pine stands. *Baltic Forestry*. 4(1):17-23.
- Valbuena, P.; del Peso, C. & Bravo, F. 2008. Stand density management diagrams for two mediterranean pine species in eastern Spain. *Invest Agrar: Sist Recur For*. 17(2):97-104.

- Vanclay, J. & Sands, P. 2009. Calibrating the self-thinning frontier. *Forest Ecology and Management*. 259(1):81-85.
- Vestøl, G. & Høibø, O. 2000. Internal distribution of sound and dead knots in *Picea abies* (L.) Karst. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 58(1-2):107-114.
- Watkinson, A. 1980. Density-dependence in single-species populations of plants. *Journal of Theoretical Biology*. 83:345-357.
- Weiskittel, A.; Gould, P. & Temesgen, H. 2009. Sources of variation in the self-thinning boundary line for three ecologically-distinct species. *Forest Science*. 55(1):84-93.
- Weller, D. 1987. A reevaluation of the $-3/2$ power rule of plant self-thinning. *Ecological Monographs*. 57(1):23-43.
- White J. 1981. The allometric interpretation of the self-thinning rule. *J. Theor. Biol.* 89:475-500.
- Whitehead, R.; Martin, P. & Powelson, A. 2001. Forest health: reducing stand and landscape susceptibility to mountain pine beetle. Forest Practice Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, B.C. Stand Density Management Diagrams.
- Xue, L.; Ogawa, K.; Hagihara, A.; Liang, S. & Bai, J. 1999. Self-thinning exponents based on the allometric model in Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) and Prince Rupprecht's larch (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) Stands. *Forest Ecology and Management*. 117:87-93.
- Yoda, K.; Kira, T.; Ogawa, H. & Hozumi, K. 1963. Intraspecific competition among higher plants. XI: Self-thinning in overcrowd pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Osaka City University Institute of Polytechnics*. 14:107-129.
- Zhang, L.; Bi, H.; Gove, JH. & Heath, LS. 2005. A comparison of alternative methods for estimating the selfthinning boundary line. *Can. J. For. Res.* 35(6):1507-1514.
- Zeide, B. 1987. Analysis of the $3/2$ power law of self thinning. *Forest Science*. 33:517-537
- Zunino, C. 1995. Análisis de la teoría de auto-raleo en plantaciones de pino insigne (*Pinus radiata* D. Don). Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 72 p.

Determinación de *site form* para renovales de roble en la precordillera andina de la Región del Maule basado en una ecuación generalizada altura-diámetro

Patricio Corvalán Vera

Resumen

Se construyó un modelo para la determinar el *site form* (SF) definido como la altura esperada de árboles de roble a un diámetro a la altura de pecho clave ($DAPc$) basado en una ecuación generalizada en que se estima la altura total (H) utilizando el diámetro a la altura de pecho (DAP) y la altura dominante ($Hdom$) como variables predictoras. El modelo utilizado es el de Chapman-Richards. En la construcción se utilizó 74 parcelas temporales de radio variable, con 908 árboles de roble creciendo en la precordillera andina de la Región del Maule. Se exploró el modelo de tres y cuatro parámetros al considerar solo el DAP o el DAP y $Hdom$ como variables predictoras, respectivamente. La incorporación de $Hdom$ en la predicción del modelo de tres parámetros reduce la varianza no explicada en 17,6%, reflejando la natural estratificación que se produce por los distintos estados de desarrollo de los rodales. Del análisis y comparación de residuos con otros trabajos similares es posible deducir que el modelo propuesto permite estimaciones eficientes de las alturas totales. La ecuación final se expresa para tres clases de $DAPc$: 15, 25 y 35 cm y se expresan gráficamente las ecuaciones de SF relativas para cinco clases relativas: 0,8; 0,9; 1,0; 1,1 y 1,2.

Palabras claves: Relaciones altura-diámetro, modelo Chapman-Richards, roble.

Introducción

La altura total (H) de los árboles es una variable de estado asociada a la calidad del sitio (Vanclay & Henry, 1988; Husch *et al.*, 2003; Avery & Burkhart, 1994; Philip, 1994; Koch *et al.*, 2004). En los renovales no manejados sin embargo, la alta densidad del rodal y presencia de sotobosque limita seriamente la visibilidad de la copa generando errores de medición de H (Corvalán *et al.*,

1987). Los errores de medición son especialmente comunes en rodales de alta densidad (St-Onge *et al.*, 2004; Larjavaara & Muller, 2013). Este error y su alto costo han llevado a los dendrómetros a utilizar modelos de regresión lineales y no-lineales de estimación de H , utilizando el diámetro a la altura de pecho (DAP) como variable independiente, por su facilidad de medición y bajo costo.

La altura dominante (H_{dom}) de los rodales, definida como el valor promedio de una cierta cantidad fija de árboles por hectárea de mayor DAP (Reineke, 1933; Gezan *et al.*, 2007; Castedo *et al.*, 2009; Castaño *et al.*, 2013) o de H (Herrera *et al.*, 2004; Newton *et al.*, 2005) o de los árboles dominantes y codominantes (Luther, 1937; Sharma & Parton, 2007), es la variable más comúnmente utilizada en rodales coetáneos para definir la calidad del sitio. En plantaciones se utiliza el concepto de índice de sitio (IS) como la altura dominante estimada a una edad clave (García, 1970; Amateis & Burkhart, 1985; Corvalán *et al.*, 1987; Trincado *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2005). En rodales naturales donde no es posible definir una edad de origen, es demasiado variable o simplemente no se puede medir, se utiliza el concepto de *site form* (SF), que es la altura de los árboles del rodal a un DAP clave (DAP_c) (Vanclay & Henry, 1988; Herrera *et al.*, 2004).

En la construcción de los Diagramas de Manejo de la Densidad (DMD) para roble se ha optado por utilizar el concepto de SF –debido a la imposibilidad de medir la edad de los rodales– como una medida aproximada de calidad de sitio y para ello se asume que la determinación de una familia de curvas H - DAP , utilizando H_{dom} como variable sustitutiva de la edad del rodal, es lo suficientemente precisa para estimar H y con ello la calidad de sitio de un rodal particular.

Vanclay & Henry (1988) propusieron la construcción de una familia de ecuaciones del tipo $H=f(DAP)$ en rodales coetáneos y multietáneos de *Callistris sp.* en el sur de Queensland, Australia, definiendo un D_c de 25 cm, comúnmente encontrados en esos bosques. En el presente trabajo se propone el uso del modelo de Chapman-Richards de tres y cuatro parámetros para la estimación de H y SF en árboles y rodales, respectivamente (Fekedulegn *et al.*, 1999; Bi *et al.*, 2000; Zhao-gang & Feng-ri, 2003; Sharma & Parton, 2007; Kershaw *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2008; Rijal *et al.*, 2012). La flexibilidad y bondad del modelo de Chapman-Richards pueden ser revisadas en detalle en Zhao-gang & Feng-ri (2003), y discutidas en Kershaw *et al.* (2008) y Sharma & Parton (2007).

Método

Datos

La información utilizada en la construcción del modelo fue un inventario forestal realizado en el predio Monte Oscuro, precordillera de Curicó, VII Región de Chile como se ilustra en la Figura 5.7

Para la estimación de la altura total se utilizó originalmente 300 parcelas provenientes de 100 *clusters* de tres unidades de registro cada una de radio variable según *DAP*, con separación de 200 m entre *cluster* y 40 m entre parcelas con centros dispuestos en forma equilátera. Las parcelas fueron de radio variable según el tamaño de los árboles: 2, 3, 6 y 12 m para árboles de tamaño superior o igual a 7, 10, 15 y 30 cm de *DAP*, respectivamente. En ellas se registró también la especie y la altura total. De estas parcelas fueron desechadas aquellas que presentaron pendientes superiores a 60%, presencia de la especie roble bajo 60% en número de árboles, densidades inferiores a 100 árboles por hectárea y aquellas cuya relación *H* vs. *DAP* tuviese anomalías de convexidad detectadas en un análisis gráfico, quedando finalmente 74 parcelas con 908 árboles de roble para el ajuste del modelo. También se desearon aquellos árboles que presentaron problemas de sanidad o forma que fueron registrados en los formularios y aquellas especies que no fueran roble. A partir de esta información se calculó *Hdom* (m) como la altura media de los 100 árboles de mayor *DAP* por hectárea, independientemente de su especie y el número de árboles por hectárea (*N*) como la suma de individuos de las parcelas expandidas a la hectárea.

La Tabla 1 muestra un resumen estadístico de los datos de *DAP* y *H* y de *Hdom* y *N* de los árboles y parcelas utilizadas en el ajuste de los modelos.

Tabla 1. Estadísticas de *DAP* (cm), *H* (m) de los árboles y *Hdom* (m) y *N* de las parcelas utilizadas en el ajuste de los modelos.

Nº de datos	Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
908	DAP	25,6	7,0	130,0	16,5
	H	11,9	2,0	26,0	5,2
75	Hdom	14,8	6,0	22,7	4,2
	N	2.179,8	154,7	5.436,0	1.243,3

Modelo

Se han reportado muchos modelos *H-DAP* en la literatura especializada, sin embargo, el modelo más utilizado es el de Chapman-Richards, por su gran flexibilidad e interpretación biológica de sus parámetros (Bi *et al.*, 2000; Zhao-gang & Feng-ri, 2003; Hanni, 2007; Sharma & Parton, 2007; Kershaw *et al.*, 2008).

Se utilizó el modelo en dos formas:

1. Modelo de 3 parámetros, modificado por Peng *et al.* (2001) (Sharma & Parton, 2007).

$$H = 1,3 + \beta_1 * (1 - \exp(-\beta_2 * DAP))^{\beta_3} \quad (1)$$

2. Modelo de 4 parámetros (Sharma & Parton, 2007).

$$H = 1,3 + \beta_1 * Hdom^{\beta_2} * (1 - \exp(-\beta_3 * DAP))^{\beta_4} \quad (2)$$

Donde β_i son parámetros de ajuste.

La relación *H-DAP* está sujeta a las variaciones ambientales y condiciones estructurales del rodal (López *et al.*, 2003; Temesgen *et al.*, 2007; Rijal *et al.*, 2012). Sharma & Zang (2004) relacionaron los parámetros β_i de la ecuación (1) con parámetros de rodal (área basal, número de árboles por hectárea, índice de sitio), mejorando la predicción e incorporando más variables de predicción que el modelo (1). El reemplazo de *IS* por *Hdom* en la ecuación (1) ha permitido mejorar la estimación de *H*, dando origen a la ecuación (2), propuesta por Sharma & Parton (2007), evaluada por Kershaw *et al.* (2008) y que es evaluada también en este trabajo.

Ajuste de parámetros

El ajuste de parámetros se realizó utilizando la rutina SOLVER de Excel, minimizando la suma de cuadrados entre las alturas totales medidas y las estimadas por los modelos. La rutina fue programada para usar el método Simplex, con derivadas progresivas y el método de Newton.

Indicadores de calidad del ajuste

Para comparar los modelos se utilizó las siguientes expresiones:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)}{N}, MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N-p}, R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}, R_{adj}^2 = (1 - R^2) \left(\frac{N-1}{N-p} \right)$$

siendo: $Y_i, \hat{Y}_i, \bar{Y}_i$ los valores observados, predichos y medios de las alturas, respectivamente, N el número total de observaciones y p el número de parámetros del modelo.

$Bias$ es el error de estimación que evalúa el desvío del modelo respecto de los valores observados, MSE el error medio cuadrático que analiza la precisión de los valores estimados, R_{adj}^2 el coeficiente de determinación (ajustado) que refleja la parte de la varianza total que es explicada por el modelo.

Resultados

La Tabla 2 muestra las estadísticas del ajuste de los modelos.

Tabla 2. Parámetros e indicadores de bondad de ajuste de los modelos.

Modelo	Variables	Parámetros de ajuste				Indicadores de ajuste		
		β_1	β_2	β_3	β_4	$Bias$	MSE	R_{adj}^2
(1)	DAP	18,648	0,146	0,267	–	–0,081	12,326	0,546
(2)	DAP Hdom	1,769	0,819	0,183	0,267	–0,037	7,534	0,722

De los resultados del ajuste, se observa que al incorporar *Hdom* al modelo (1) como variable predictora junto al *DAP*, tanto los errores absolutos ($Bias$) como los cuadráticos (MSE) disminuyen, lo que a su vez se ve reflejado en el porcentaje de la varianza total explicada por el modelo, aumentando en 17,6%.

Las alturas estimadas para roble en diferentes clases de altura dominante se muestran en la Figura 2.

También se grafican los residuos de los modelos en la Figura 3.

Figura 1. Altura total en función del diámetro a la altura de pecho para diferentes clases de altura dominante.

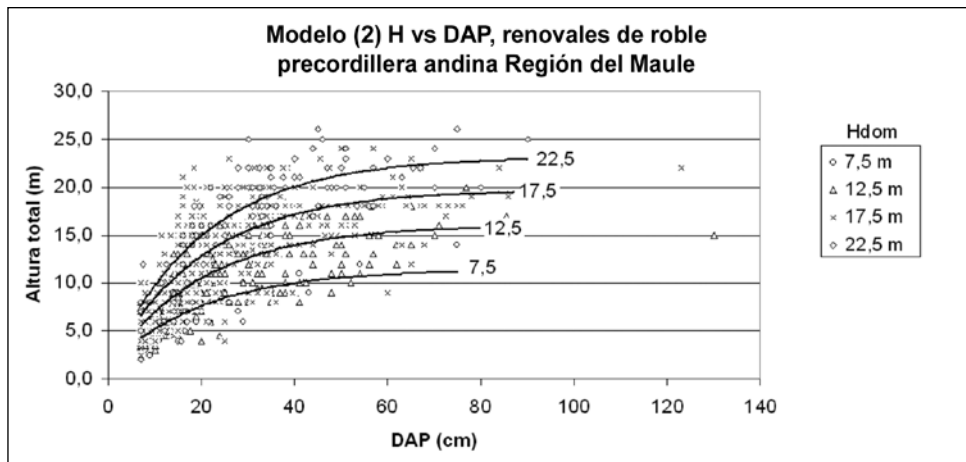
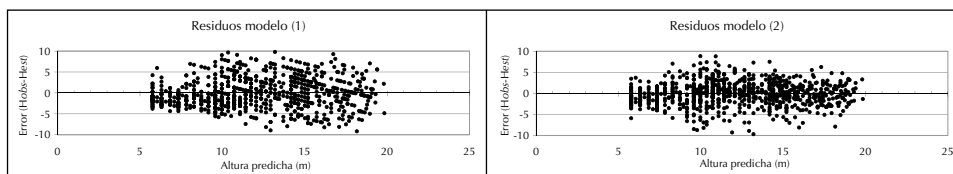


Figura 2. Distribución de residuos de altura total estimada en función de la altura total predicha para el modelo de Chapman-Richards.

Izquierda: modelo $H=f(DAP)$, derecha: $H=f(DAP, Hdom)$.



El análisis gráfico de residuos no arroja evidencia de sesgo en ninguno de los dos modelos. Por ello, el uso de la ecuación generalizada de altura indicada en el modelo (2) resulta ser el de mejor desempeño.

Para la determinación del SF de un rodal particular es necesario definir el DAP_c al que será asignado. Considerando que H_{dom} se presenta en una gran variedad de tamaños (entre 6,0 y 22,7 m), se ha optado por usar las siguientes categorías de DAP_c , considerando el valor más cercano que se indica en la Tabla 3:

Tabla 3. Clases de DAPc según clases de *Hdom*.

<i>Hdom</i> (m)	DAPc (cm)
$5 \leq Hdom < 10$	15
$10 \leq Hdom < 20$	25
$20 \leq Hdom$	35

En general los rodales que se intenta manejar se encuentran en ese rango de tamaños. La ecuación del modelo (2) entonces se resuelve para esas clases de DAPc. Los resultados se expresan en las Figuras 3 y 4, en términos absolutos de altura total o como valores relativos a la curva guía o valor esperado del modelo (2), respectivamente. La expresión relativa permite comparar el sitio de dos rodales de diferente tamaño.

Figura 3. Altura total para diferentes clases de DAPc según rangos de *Hdom*.

Los puntos corresponden a los valores observados y la línea continua representa el valor esperado para las respectivas clases.

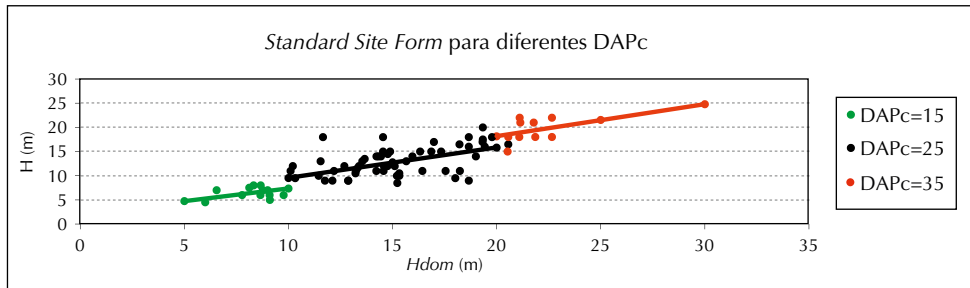
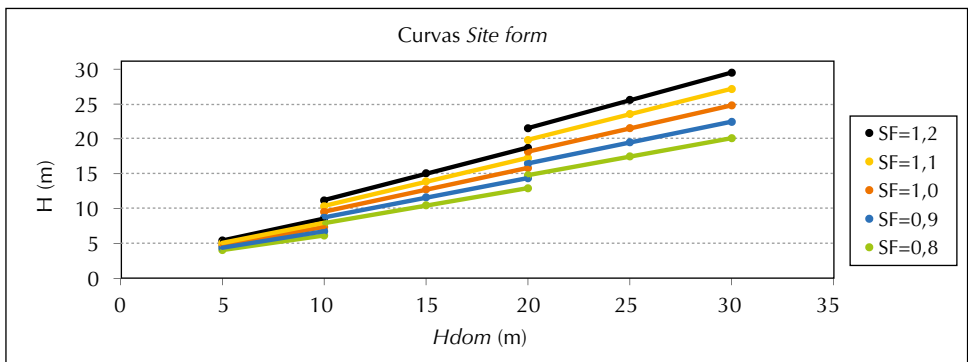


Figura 4. Familia de curvas de *site form* para diferentes clases de DAPc según rangos de *Hdom*.



Discusión

Los modelos *H-DAP* constituyen uno de los insumos más usados en la cuantificación de los rodales (Vanclay & Henry, 1988; Husch *et al.*, 2003; Avery & Burkhart, 1994; Philip, 1994; Sharma & Parton, 2007). La medición de *H* es cara y está sujeta a errores, por ello es normalmente reducida a una submuestra de árboles a los que se les mide conjuntamente con el *DAP* y se construyen estimadores de regresión (Wang & Hann, 1988; Bi *et al.*, 2000; Calama & Montero, 2004; Trincado & Leal, 2006; Kershaw *et al.*, 2008). Los parámetros de la relación *H-DAP* son muy variables, dependiendo de la edad o estructura del rodal, por esto es deseable incorporar algún parámetro que permita reducir esa fuente de variación (Calama & Montero, 2004; Trincado & Leal, 2006; Trincado *et al.*, 2007; Sharma & Parton, 2007; Kershaw *et al.*, 2008). Temesgen *et al.* (2007) lograron reducir la raíz del error medio cuadrático de la estimación de altura total en 15% en promedio al incluir en el modelo *H-D* la posición relativa del árbol y la densidad del rodal en 30 especies en el suroeste de Oregon, para especies coníferas y latifoliadas con estructuras coetáneas y multietáneas. Este valor es inferior al observado en este estudio, cuya disminución en las mismas unidades es de 21%, con valores absolutos similares. Kershaw *et al.* (2008) en un exhaustivo estudio en el sur de Indiana lograron para especies de baja correlación *H-D* aumentar el coeficiente de determinación en *virginia pine* y *shortlife pine* juveniles desde 0,43% a 0,53% y desde 0,49% a 0,82%, respectivamente, al incluir *Hdom* como variable predictora para los mismos modelos utilizados en este estudio. Sharma & Parton (2007) mejoraron la predicción de *H-D* incorporando al modelo la altura dominante, el número de árboles por hectárea y el área basal, reduciendo la varianza no explicada en 25,8% en *jack pine* y en 3,6% en *white spruce* en los casos extremos, entre varias otras especies.

En general, como ha sido señalado, la incorporación de variables de estado de rodal mejora la predicción de la altura total, situación que es constatada en este trabajo. La medición de *Hdom* es una variable habitualmente medida y permite reducir el error de predicción en 17,6%.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, G.; González, R.; Rodríguez, R. & Anta, B. 2005. Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.* 62:115-127.
- Amateis, R. & Burkhart, H. 1985. Site index curves for loblolly pine plantations on cutover site-prepared lands. *South. J. Appl. For.* 9:166-169.
- Avery, T. & Burkhart, H. 1994. Forest Measurements. New York, USA. McGraw-Hill. 4th Edition. 408 p.
- Bi, H.; Jurskis, V. & O'Gara, J. 2000. Improving height prediction of regrowth eucalypts by incorporating the mean size of site trees in a modified Chapman-Richards equation. *Australian. Forestry.* 63:257-266.
- Calama, R. & Montero, G. 2004. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Can J. For. Res.* 34:150-163.
- Castaño, J.; Barrio, M. & Álvarez, P. 2013. Regional-scale stand density management diagrams for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) stands in north-west Spain. *iForest.* 6:113-122.
- Castedo, F.; Creciente, F.; Álvarez, P. & Barrio, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stand including assessment of stand stability. *Oxford Journal Life Sciences Forestry.* 82(1):1-16.
- Corvalán, P.; Araya, L.; Calquén, R.; Loewe, V. & Niebuhr, S. 1987. El Canelo: una alternativa de desarrollo para la Décima Región. Santiago. Ministerio de Agricultura. Universidad de Chile. Vol. IV.
- Fekedulegn, D.; Mac Siurtain, M. & Colbert, J. 1999. Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silva Fennica.* 33(4):327-336.
- García, O. 1970. Índices de sitio para Pino Insigne en Chile. Inst. For. Serie de Investigación. Publicación N° 2. Santiago, Chile.
- Gezan, S.; Ortega, A. & Andenmatten, E. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 28(2):97-105.
- Hann, D. & Scribani, J. 1987. Dominant-Height-Growth and Site-Index Equations for Douglas-fir and Ponderosa pine in Southwest Oregon. Oregon State University. Research Bulletin 59.
- Hanni, D. 2007. Regional Height-Diameter Equations for Major Tree Species of Southwest Oregon. *West. J. Appl. For.* 22(3).
- Herrera, B.; Campos, J. & Kleinn, C. 2004. Site productivity estimation using height-diameter relationships in Costa Rican secondary forests. *Invest Agrar: Sist Recur For.* 13(2):295-303.

- Husch, B.; Miller, C. & Beers, T. 2003. Forest Mensuration. Florida, USA. Kreiger Publishing Company. 4th Edition. 377 p.
- Kershaw, J.; Morrissey, R.; Jacobs, D.; Seifert, J. & McCarter, J. 2008. Dominant height-based height-diameter equations for trees in southern Indiana. In: Jacobs Douglass F.; Michler, Charles H., eds. 2008. Proceedings, 16th Central Hardwood Forest Conference; 2008 April 8-9; West Lafayette, IN. Gen. Tech. Rep. NRS-P-24. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station: 341-355.
- Koch, G.; Sillett, S.; Jennings, G. & Davis, S. 2004. The limits to tree height. *Nature*. 428:851-854.
- Larjavaara, M. & Muller, H. 2013. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*.
- López, C., Varela, J.; Dorado, F.; Alboreca, A.; Soalleiro, R.; Álvarez, J. & Rodríguez, F. 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Ann. For. Sci.* 60:237-245.
- Luther, G. 1937. Yield, Stand, and Volume Tables for Even-aged Upland Oak Forests. Allegheny Forest Experiment Station, 1. Forest Service. Technical Bulletin No. 560.
- Newton, P.; Lei, Y. & Zhang, S. 2005. Stand-level diameter distribution yield model for black spruce plantations. *Forest Ecology and Management*. 209:181-192.
- Peng, C.; Zhang, L. & Liu, J. 2001. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forests. *North. J. Appl. For.* 18:87-94.
- Pereira, J.; García, H.; Boechat, C.; Chagas, J.; Smit, L. & Saraiva, G. 2008. Growth and Site Index Curves for *Tectona grandis* Stands in Tanga da Serra, Matogrosso State, Brazil. *Árvore, Viçosa-MG*, v.32, n.4, p.679-685.
- Philip, M. 1994. Measuring Trees and Forests. UK, CAB Internacional. 2th Edition. 293 p.
- Reineke L. 1933. Perfecting a Stand-density Index for Even-aged Forests. *Journal of Agricultural Research* Vol. 46 (7).
- Rijal, B.; Weiskittel, A. & Kershaw, J. 2012. Development of regional height to diameter equations for 15 tree species in the North American Acadian Region. *Forestry*. 85(3):379-390.
- Sharma, M. & Zhang, S. 2004. Height-diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*. *Scand. J. For. Res.* 19:442-451.

- Sharma, M. & Parton, J. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*. 249:187-19.
- St-Onge, B.; Jumelet, J.; Cobello, M. & Véga, C. 2004. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. *Canadian Journal of Forest Research*. 34(10): 2122-2130, 10.1139/x04-093.
- Temesgen, G.; Hann, D. & Monleon, V. 2007. Regional height-diameter equations for major tree species of southwest Oregon. *West. J. Appl. For.* 22:213-219.
- Trincado, G.; Viviste, A & Von Gadow, K. 2002. Preliminary Site Index Models for Native Roble (*Nothofagus obliqua*) and Rauli (*N. alpina*) in Chile. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 32(3):322-333.
- Trincado, G. & Leal, C. 2006. Ecuaciones locales y generales de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque*. 27(1):23-34.
- Trincado, G.; VanderSchaaf, C. & Burkhart, H. 2007. Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Eur J. Forest Res.* 126:253-262.
- Vanclay, J. & Henry, N. 1988. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland. *The Commonwealth Forestry Review*. 53-64.
- Wang, C. & Hann, D. 1988. Height-diameter equations for sixteen tree species in the Central Western Willamette Valley of Oregon. Forest Research Lab., College of Forestry, Oregon State University. 7 p.
- Zhao-gang, L. & Feng-ri, L. 2003. The generalized Chapman-Richards function and applications to tree and stand growth. *Journal of Forestry Research*. 14(1):19-26.

Estimación de altura dominante y área basal mediante datos LiDAR

Jaime Hernández^{1,2}, Javier Lopatín², Patricio Corvalán^{1,2}

Introducción

En la construcción de los Diagramas de Manejo de la Densidad (DMD) es indispensable medir rodales que cubran todos los rangos de área basal, altura dominante y número de árboles por hectárea para la determinación de la línea de inminente mortalidad por competencia. De ello se deriva que esta tarea no puede ser ejecutada con parcelas medidas al azar y por ello es fundamental tener información de apoyo que permita distribuir las muestras en todo el rango indicado.

Las fuentes de información disponibles para ello son habitualmente los inventarios forestales y los sensores remotos que permiten la extracción de información asociada a estos parámetros de rodal.

La construcción de un modelo de estimación de alturas dominantes y área basal constituye una buena herramienta para la preselección de unidades muestrales en la construcción de los DMD.

En este anexo se describe la metodología utilizada para la construcción de un modelo de estimación de alturas dominantes y área basal en Monte Oscuro, cuyo producto final fue una cartografía de estas variables espacializadas que sirvió de apoyo a la preselección de muestras para su medición en la próxima etapa del proyecto.

¹ Departamento de Gestión Forestal y de su Medio Ambiente, Universidad de Chile.

² Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje, Universidad de Chile.

Metodología

Para construir el modelo se utilizaron 293 parcelas circulares de radio variable para la estimación de los parámetros de rodal, en la misma posición en que obtuvieron las parcelas de terreno. Dentro de cada parcela se extrajeron 47 variables vegetacionales derivadas de la nube de puntos (NP) LiDAR.

Para extraer estas variables, en primer lugar fue necesario normalizar la nube de puntos, esto quiere decir transformar la información de altitud almacenada en cada retorno desde metros sobre el nivel del mar (msnm) a metros sobre el terreno. Para eso se utilizó el *software* LasTools siguiendo los siguientes pasos:

1. Se transformó la NP desde un archivo de texto (.txt) a un archivo de intercambio LASer (.las), mediante el siguiente comando:

```
txt2las -i %1.txt -o %1.las
```

2. Luego se le clasificó los retornos entre aquellos que corresponden a la superficie y aquellos que no:

```
lasground -i %1.las -o %1_c2.las
```

3. Finalmente se normalizó la NP:

```
lasheight -i %1.las -o %1_norm.las -replace_z
```

Las variables predictoras vegetacionales se estimaron mediante la utilización de la herramienta Cloudmetrics del *software* Fusion. Estas variables son las siguientes:

- Total return: Retornos totales dentro de la grilla
- Elevminimum: Elevación mínima registrada
- Elev maximum: Elevación máxima registrada
- Elev mean: Media de la elevación
- Elevmode: Moda de la elevación
- Elevstddev: Desviación estándar de la elevación
- Elevvariance: Varianza de la elevación
- Elev CV: Coeficiente de variación de la elevación
- Elev IQ: Distancia intercuantile de la elevación
- Elevskewness: Oblicuidad de la elevación
- Elevkurtosis: Curtosis de la elevación
- Elev AAD: AverageAbsoluteDeviation
- Elev MAD median: Median of the absolute deviations from the overall median.

- Elev MAD mode: Median of the absolute deviations from the overall mode
- Elev L1: Primer L-Moment
- Elev L2: Segundo L-Moment
- Elev L3: Tercer L-Moment
- Elev L4: Cuarto L-Moment
- Elev L CV: Coeficiente de variación de los L-Moments
- Elev L skewness: Oblicuidad de los L-Moments
- Elev L kurtosis: Curtosis de los L-Moments
- Elev P01: Percentil 1% de la elevación
- Elev P05: Percentil 5% de la elevación
- Elev P10: Percentil 10% de la elevación
- Elev P20: Percentil 20% de la elevación
- Elev P25: Percentil 25% de la elevación
- Elev P30: Percentil 30% de la elevación
- Elev P40: Percentil 40% de la elevación
- Elev P50: Percentil 50% de la elevación
- Elev P60: Percentil 60% de la elevación
- Elev P70: Percentil 70% de la elevación
- Elev P75: Percentil 75% de la elevación
- Elev P80: Percentil 80% de la elevación
- Elev P90: Percentil 90% de la elevación
- Elev P95: Percentil 95% de la elevación
- Elev P99: Percentil 99% de la elevación
- Canopy relief ratio: Canopy relief ratio
- Elev SQRT mean SQ: Elevation quadratic mean
- Elev CURT mean CUBE: Elevation cubic mean
- Distancia intercuartil de la elevación: la distancia intercuartil o rango intercuartil, se conoce como la diferencia entre el tercer y el primer cuartil. Es una medida de dispersión estadística (McGaughey, 2012).

El significado de algunas de estas variables es el siguiente:

- a) ElevationSkewness: es un indicador de cuán asimétrica es la distribución de las altitudes (McGaughey, 2012).
- b) ElevationKurtosis: Es un indicador de cuán escarpada (*peaky*) es la distribución de las altitudes (McGaughey, 2012).
- c) AverageAbsoluteDeviation: es un robusto estimador de la variabilidad dentro de una serie de datos, el que está elaborado a base de la media de los datos (McGaughey, 2012).

- d) Median of the absolute deviations from the overall median: es un estimador robusto de la variabilidad dentro de una serie de datos, el que está elaborado a base de la mediana de los datos (McGaughey, 2012).
- e) Median of the absolute deviations from the overall mode: es un estimador robusto de la variabilidad dentro de una serie de datos, el que está elaborado a base de la moda de los datos (McGaughey, 2012).
- f) "L-moments" de la elevación: son una combinación lineal de orden estadística creada por Hosking (1990). Estos pueden caracterizar un mayor rango de distribución, presentan una mayor robustez en la presencia de *outliers*, están sujetos a un menor sesgo en la estimación y aproximan su distribución normal asintótica más cerca en muestras finitas que otras distribuciones de momentos normales (Hosking, 1990). Los "L-moments" se pueden desagrupar en cuatro facciones de momentos (L1, L2, L3 y L4) según lo planteado por Wang (1996), donde L1 da cuenta de la magnitud de la variable aleatoria, L2 da cuenta de cuan variable es la variable aleatoria, L3 da cuenta de cuán asimétrica la distribución es y L4 muestra cuán escarpada (*peaky*) es la distribución de la variable. Estos cuatro momentos se estimaron para las altitudes de los retornos de la nube de puntos.
- g) Coeficiente de variación del "L-moment" de la elevación: Hosking (1990) lo define como el cociente entre el segundo "L-moment" y el primer "L-moment" (L2/L1).
- h) Oblicuidad del "L-moment" de la elevación: Hosking (1990) lo define como el cociente entre el tercer "L-moment" y el segundo "L-moment" (L3/L2).
- i) Curtosis del "L-moment" de la elevación: Hosking (1990) lo define como el cociente entre el cuarto "L-moment" y el segundo "L-moment" (L4/L2).
- j) Proporción de apertura del dosel (Canopyrelief ratio): según McGaughey (2012) este está dada por la siguiente ecuación:

$$Canopy_{reliefratio} = \left(\frac{media - min}{max - min} \right)$$

- a) Media cuadrática y cúbica de la elevación: la media generalizada para la segunda y la tercera potencia se estima de la siguiente manera:

$$M_p = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

Donde n es el tamaño poblacional de los retornos y p representa el número de la potencia que se desea obtener (p = 2 y p = 3 para elevación cuadrática y cúbica, respectivamente) (McGaughey, 2012).

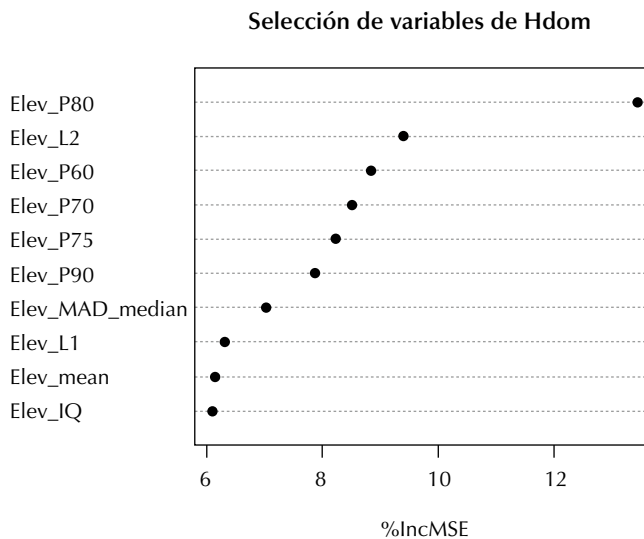
Espacialización de las variables

Para crear un mapa de la altura dominante y el área basal, fue necesario extrapolar los datos de *Hdom* y *AB* medidos en las parcelas de estudio a otras áreas de la zona de estudio. Para eso se creó una grilla de cuadrados de 50 x 50 m, donde a cada cuadrado se extrajeron las mismas variables predictivas vegetacionales de las parcelas de estudio.

Se utilizó el algoritmo Random Forest (RF) para seleccionar las variables predictivas que mejor explican la altura dominante (*Hdom*) y el área basal (*AB*) y para extrapolar los valores predichos a las coordenadas de la grilla generada.

Altura dominante

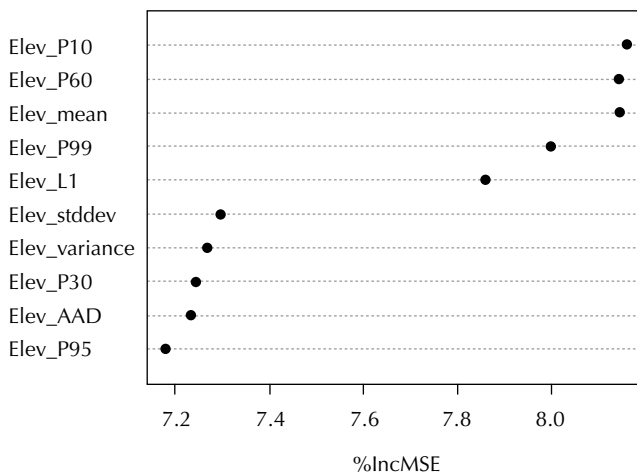
Se obtuvo una explicación del 28% mediante el algoritmo RF, donde las variables seleccionadas fueron las siguientes: El percentil 80%, 60%, 70%, 75% y 90% de la altitud, el primer y segundo L-moment de la altitud, la mediana de los desvíos absolutos de la altitud y la distancia intercuantil de la elevación.



Área basal

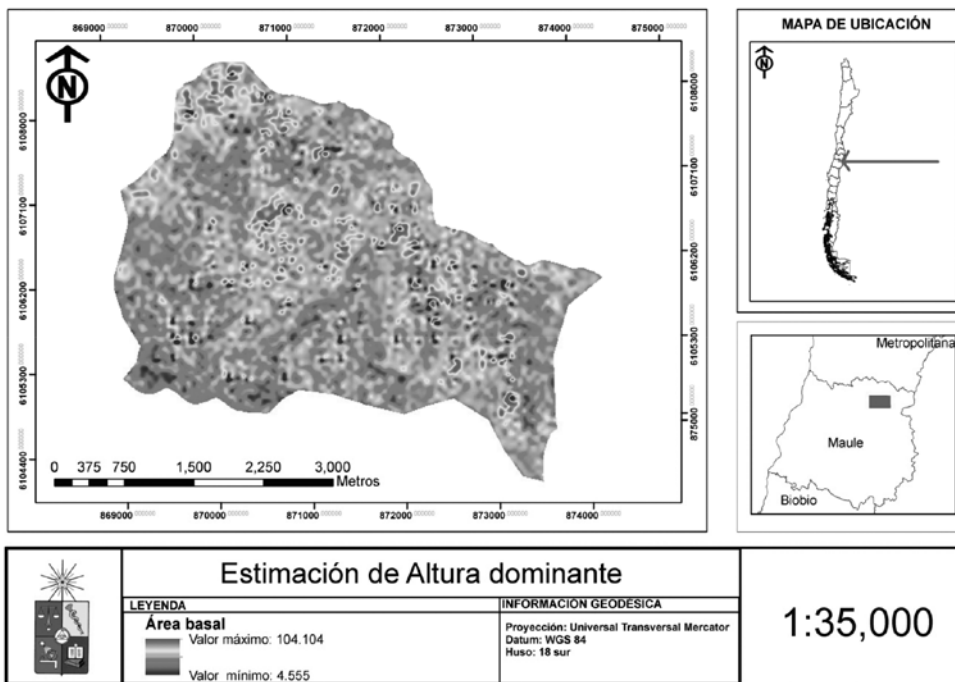
Se obtuvo una explicación del 20% mediante el algoritmo RF, donde las variables seleccionadas fueron las siguientes: El percentil 10%, 30%, 60% y 95% de la altitud, el primer L-moment de la altitud, la media, varianza y la desviación estándar de las altitudes y la desviación promedio absoluta.

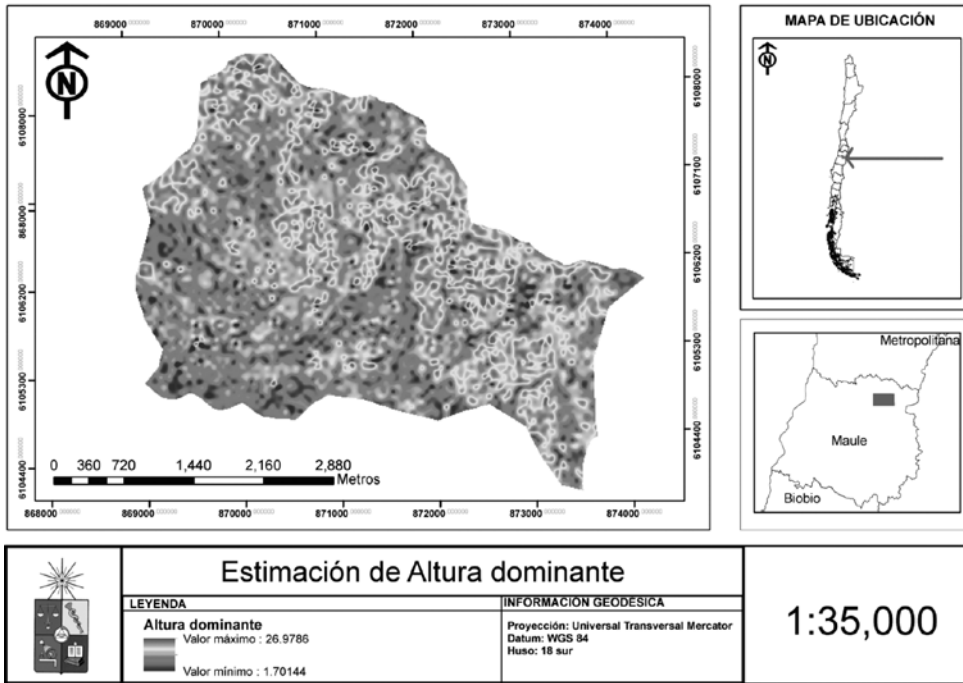
Selección de variables de AB



Mapas

Siguiendo la lógica del algoritmo RF, se extrapoló los valores de Hdom y AB para cada centroide de la grilla generada. Finalmente, interpolando los datos generados mediante el método *spline* se obtuvo los siguientes mapas:





Bibliografía

- Hosking, J.R.M. 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society*. 52(1):105-124.
- McGaughey, R. 2012. Fusion/LDV: Software for LiDAR Data Anlalysis and Visualization. Forest Service of the Department of Agriculture of the United States. Washington, USA. 170p.

Funciones de volumen hasta un diámetro de utilización de 10 cm para renovales de roble en la precordillera andina del Maule, Chile

Patricio Corvalán Vera¹

Resumen

En el presente informe se describe la metodología y se analizan los resultados de la construcción de funciones estimadoras del volumen bruto sólido con corteza hasta un índice de utilización de 10 cm (Vol IU 10 cm) para renovales de *Nothofagus obliqua* (roble) de la precordillera andina en la región del Maule. Se detallan a continuación la metodología y principales resultados obtenidos. Todos los análisis fueron conducidos usando el *software* R (R Development Core Team 2014).

Introducción

Para determinar tanto el nivel de crecimiento óptimo del rodal como función del nivel de densidad como para determinar las isolíneas de volumen en la construcción de los Diagramas de Manejo de la Densidad se requiere conocer ecuaciones de volumen (Drew & Flewelling, 1979; Newton & Weetman, 1994; Dean & Baldwin, 1993). En el proyecto 046/2013 del Fondo de Investigación del Bosque Nativo denominado "Diagramas de manejo de densidad para el control del tamaño de ramas en bosques septentrionales alto andinos dominados por Roble en la Región del Maule" se requiere que estas ecuaciones sean predichas como función del diámetro a la altura de pecho (DAP) de los árboles y de su altura total (H).

¹ Departamento de Gestión Forestal y su Medioambiente, Universidad de Chile
E-mail: pcorvala@chile.cl. Departamento de Gestión Forestal y de su Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis estadístico comparativo de cuatro modelos estimadores del $Vol IU 10$ función del DAP y H de árboles dominantes para el cálculo del crecimiento anual periódico en volumen y la construcción de la isolínea de volumen en el diagrama de manejo de la densidad (DMD). Se reportan los parámetros estimados de los modelos, así como un análisis de capacidades predicativas de estos.

Metodología

Datos

Los datos provienen de mediciones de 60 árboles pertenecientes al cuartil superior de DAP de un subconjunto de parcelas de distintas condiciones de densidad y desarrollo de renovales creciendo en la precordillera del Maule utilizados en la construcción del diagrama de manejo para la densidad de roble del proyecto 046/2013 del Fondo de Investigación del Bosque Nativo (Corvalán, 2014).

Las variables utilizadas son las siguientes:

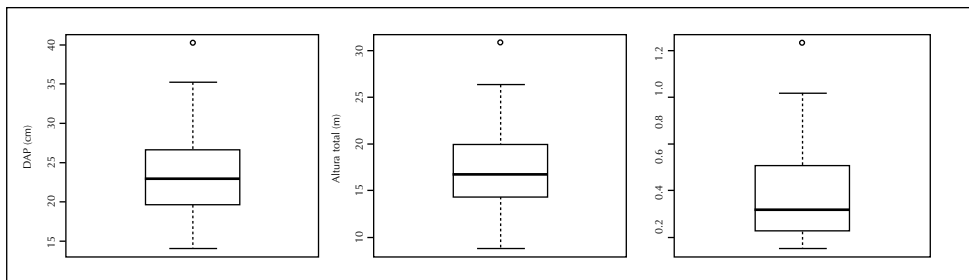
- Diámetro a la altura del pecho (DAP) medido en cm con corteza. Esta variable fue medida como el radio medio geométrico fustal medido en los ejes mayores y menores a 1,3 m del suelo.
- Altura total (H) medido en m, cm. En esta variable fue medida la longitud del fuste principal medido desde el suelo hasta el ápice, una vez volteado el árbol.
- Diámetro medio geométrico fustal con corteza en el eje mayor y menor medido cada 1 m de diferencia en altura aproximadamente en la sección internodal del fuste.
- Los volúmenes de madera brutos con corteza de cada árbol se han calculado mediante la cubicación de cada una de las secciones fustales usando la fórmula de Smalian hasta un diámetro mayor o igual a 10 cm y en la sección bajo el tocón usando la fórmula del cilindro (Husch *et al.*, 2003). El volumen total del árbol es la resultante de la suma de todas las secciones.

Una estadística descriptiva de los datos se muestra a continuación:

	DAP (cm)	H (m)	Vol IU 10 (m³arbol⁻¹)
Promedio	23,4	17,1	0,378
Mínimo	14,1	8,8	0,084
Máximo	40,2	30,9	1,264
Des. Stand.	5,5	4,5	0,256
CV (%)	23,7	26,5	67,697

La distribución de las variable *DAP*, *H* y *Vol IU 10* (Figura 1) representan las distribuciones clásicas para estas variables, como es destacado por la literatura (e.g., van Laar & Akca, 2007; Husch *et al.*, 2003).

Figura 1. Distribución de las variables DAP, H y Vol IU 10.



La relación entre las variables se presenta en un *Scatterplot* en la Figura 2 que muestra que entre *DAP* y *H* la relación es levemente cóncava con una amplia dispersión de alturas y entre *DAP* y *Vol IU 10*, y *H* y *Vol IU 10* la relación es exponencial.

Modelos

Se ajustaron cuatro modelos tradicionales en la construcción de funciones generales de volumen mediante el método de los mínimos cuadrados, combinando *DAP* y *H* como variables independientes y *Vol IU 10* como variable independiente.

Las funciones usadas fueron:

$$Vol IU 10 = \alpha + \beta * DAP^2 * H \text{ Spurr (1952)} \quad (1)$$

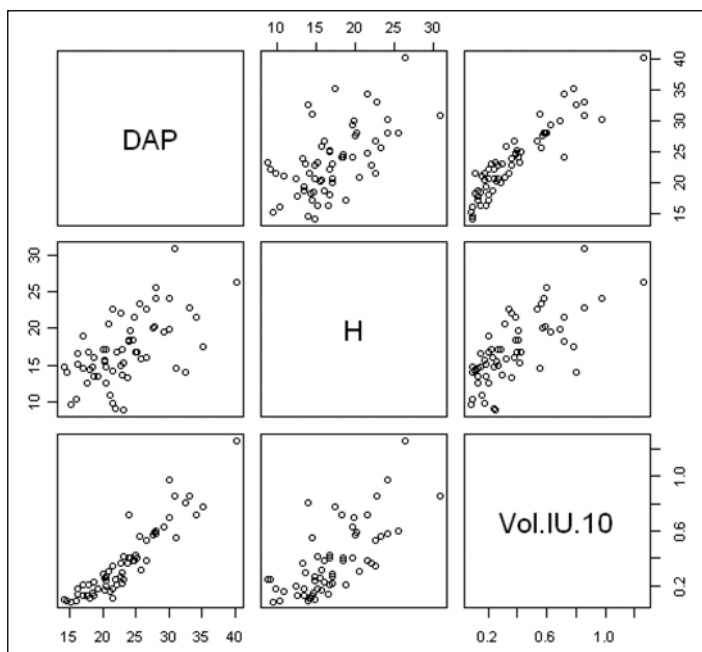
$$\ln(Vol IU 10) = \ln \alpha + \beta * \ln(DAP) + \gamma * \ln(H) \text{ Schumacher \& Hall (1933)} \quad (2)$$

$$\text{Vol IU 10}/H = \alpha + \beta * \text{DAP}^2 \text{ Corvalán} \tag{3}$$

$$\text{Vol IU 10}/\text{DAP}^2 = \alpha + \beta * H \text{ Corvalán} \tag{4}$$

Las ecuaciones (1) y (2) son las más ampliamente usadas en la construcción de tablas de volumen general y las ecuaciones (3) y (4) se formulan en este trabajo con el objeto de corregir posibles sesgos que se generen en los árboles de pequeño tamaño por efecto de la constante. En el caso de las variables combinadas (*Spurr*) el coeficiente α de la ecuación (1) puede ocasionar sesgos de importancia, especialmente en renovales jóvenes donde existe una alta densidad de árboles y por lo tanto su inferencia a valores por hectárea puede resultar riesgoso. La eliminación de este coeficiente como solución resuelve este problema pero rigidiza mucho al modelo al tener un solo parámetro. Por ello en este trabajo se han propuesto dos modelos adicionales basados en la idea de establecer un par de relaciones lineales entre *Vol IU 10*/*H* y *DAP*² y *Vol IU 10*/*DAP*² y *H*, con dos parámetros de ajuste, que resuelven el problema señalado. La ecuación (2) es la más flexible de las cuatro pero al ajustarla a los datos no hay garantía de incesgamiento. Por ello se proponen y evalúan estos cuatro modelos.

Figura 2. Scatterplot entre DAP, H y Vol IU 10.



Comparación de modelos

Para cada modelo se calcularon estadísticos de validación para evaluar las capacidades predictivas de los modelos, siguiendo la nomenclatura y observaciones de Salas *et al.* (2010). Los estadísticos se detallan a continuación:

(a) Diferencia agregada (AD) o residual medio, calculada mediante

$$AD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (5)$$

Donde, $r_i = \text{Vol IU 10 observado} - \text{Vol IU 10 estimado}$ por cada modelo, n es el tamaño muestral.

(b) Raíz cuadrada de las diferencias (RMSD)

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (6)$$

(c) Suma absoluta de las diferencias (AAD),

$$AAD = \sum_{i=1}^n |r_i| \quad (7)$$

Resultados

Ajuste de modelos

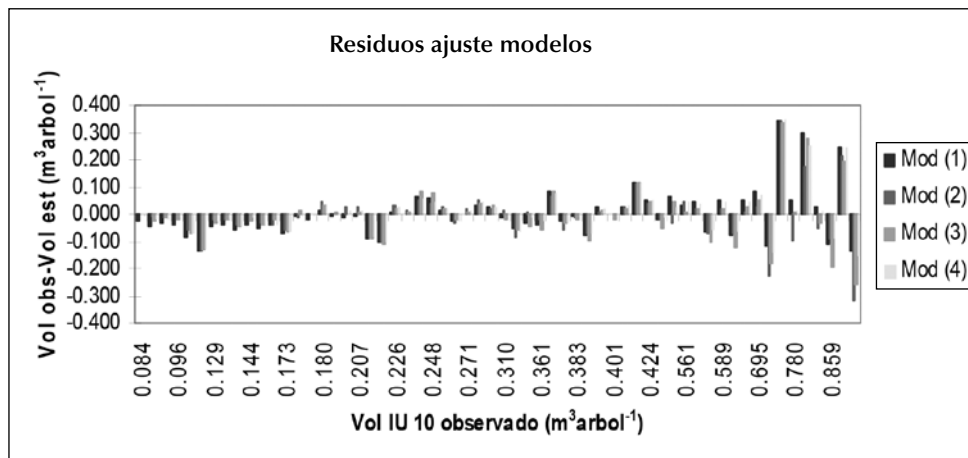
Un resumen de los parámetros estimados para los modelos se muestra en la Tabla 1, donde se muestran en **negrita y cursiva** los valores muy significativos y en **negrita normal** los valores significativos.

Tabla 1. Parámetros estimados para los modelos de diámetro de copa (ecuaciones 1-4).

Modelo	Parámetros			Bondad de ajuste				
	α	β	γ	R^2	Se	AD	RMSD	AAD
1	0,04035	0,31789	–	0,8796	0,08949	0,001	0,087	0,059
2	-10,2067	2,2803	0,6736	0,9041	0,2142	-0,007	0,089	0,055
3	0,0007387	0,0000352	–	0,7834	0,005263	-0,007	0,092	0,060
4	0,0001297	0,0000282	–	0,4881	0,000132	0,004	0,083	0,053

Los estadísticos R^2 y Se reflejan la correlación y el error de las variables en las dimensiones en las que se realizó el ajuste y no resultan comparables observando las ecuaciones originales (1 a 4). Los estadísticos AD , $RMSD$ y AAD sí permiten la comparación entre modelos, ya que están en la dimensión original ($m^3 arbol^{-1}$). Para la selección del modelo debe considerarse el análisis gráfico de residuos (Figura 3). De la Tabla 1 se deduce que el modelo (1), si bien tiene el valor AD más bajo, su constante α sobreestima el volumen en árboles de tamaño pequeño y subestima en diámetros superiores. El modelo (4) tiene una tendencia similar pero con residuos menores. Los modelos (2) y (3) presentan un leve sesgo de sobreestimación de volumen en árboles de pequeño tamaño, pero de menor cuantía que los modelos (1) y (4). Las estadísticas de residuos son bastante similares entre ambos modelos, pero al ajustar los residuos sobre el volumen observado, el modelo (3) presenta mayor independencia que el modelo (2), razón por la que ha sido seleccionado como el modelo a utilizar. Al comparar la variación explicada por el modelo como la suma de desvíos cuadráticos estimados sobre el desvío cuadrático de la media (pseudos- R^2) se constata que los porcentajes explicados por los modelos (1, 2, 3 y 4) son 88,1%; 86,7%; 89,3% y 87,7%, respectivamente, reafirmando la conclusión que el mejor modelo es el (3).

Figura 3. Dispersión de residuos de los modelos como función del volumen observado.



Conclusiones

- El DAP y H explican entre 86,7 y 89,3% de la variación de $Vol IU 10$.
- Todos los modelos presentan una subestimación de valores para árboles de diámetro pequeño
- Los modelos tradicionales (variables combinadas y logarítmicas) pueden ser mejorados con una transformación lineal de variables (modelos (3) y 4)
- El modelo (3) propuesto en este trabajo cuya forma es $Vol IU 10/H = \alpha + \beta DAP^2$ presenta los mejores resultados

Referencias

- Corvalán P. 2014. Diagramas de manejo de densidad para el control del tamaño de ramas en bosques septentrionales alto andinos dominados por Roble en la Región del Maule. Primer Informe de Avance. Fondo de Investigación del Bosque Nativo. Proyecto 046/2013.
- Dean, T. & Baldwin, C. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. Research Paper SO-275. Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Louisiana. USDA.
- Drew, T. & Flewelling, J. 1979. Stand density management: An alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *Forest Science* 25, 518-532.
- Husch, B.; Beers, T.W. & Kershaw, J.A. 2003. *Forest Mensuration*. 4th edition. New York, USA. Wiley. 443 p.
- Newton, P. & Weetman, G. 1994. Stand density management diagram for managed black spruce stands. *Forestry Chronicle*. 70:65-74.
- R Development Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Salas, C.; Ene, L.; Gregoire, T.G.; Naesset, E. & Gobakken, T. 2010. Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models. *Remote Sensing of Environment*. 114(6):1277-1285.
- Schumacher, F. & Hall, F. 1933. Logarithmic expression of timber tree volume. *J. Agric. Res.*47:719-734.
- van Laar, A. & Akca, A. 2007. *Forest Mensuration*. Dordrecht, The Netherlands. Springer. 383 p.

Limitaciones al uso del *site form* en los renovales de *Nothofagus obliqua* (roble)

Patricio Corvalán Vera¹

La cuantificación del sitio en los bosques naturales de estructuras multietáneas o irregulares es un tema pendiente acerca del que recién están apareciendo algunas propuestas novedosas. En este tipo de bosques no es posible construir índices de sitio, ya que desaparece el concepto de edad del rodal. Por ello Vanclay & Henry (1988) propusieron el concepto de *site form* definido como la altura total de los árboles de un rodal a un diámetro clave en rodales multietáneos. Huang & Titus (1993) utilizaron este concepto en rodales mixtos, incorporando otras variables de estado del rodal para mejorar las predicciones. El supuesto es que en los mejores sitios los árboles alcanzan mayor altura total que árboles de igual diámetro en sitios de inferior calidad.

Para utilizar este concepto en renovales de roble Corvalán (2015) construyó un modelo de altura de la forma

$$H = 1,3 + 1,769 * Hdom^{0,819} * (1 - \exp(-0,183 * DAP))^{0,267} \quad (1)$$

Donde H es la altura del rodal cuando tiene un DAP clave y el rodal tiene una altura dominante $Hdom_{(100)}$

Para determinar el *site form* de un rodal se debe elegir un DAP clave, adecuado al tamaño del rodal, siendo los propuestos 15, 25 y 35 cm (Corvalán, 2015), luego medir la altura de los árboles en pie de acuerdo con lo propuesto por Vanclay & Henry (1988) para ese DAP y finalmente dividir el valor de altura en terreno con el calculado en la ecuación (1). Ese valor será el *site form* del rodal, expresado como porcentaje.

¹ pcorvala@chile.cl. Departamento de Gestión Forestal y de su Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

Para poder utilizar adecuadamente el concepto de sitio definido por la ecuación (1) se requiere que la altura estimada sea precisa y que su estimador esté exento de los errores propios de las mediciones de altura con que habitualmente se miden los árboles. Una de las variables que mayor incidencia tiene en la magnitud de este error es la densidad del rodal, ya que afecta tanto la visibilidad del árbol (base y ápice del árbol) como la medición de la distancia (Bailey, 1994; St-Onge *et al.*, 2004; Larjavaara & Muller, 2013; Bailey, 1994). Por ello, en este documento se reporta el resultado de contrastar la medición en pie de la altura total de 58 árboles del cuartil superior de DAP de parcelas utilizadas para la medición de ramas con la longitud total del fuste una vez volteado. Las mediciones en pie (altura estimada) se realizaron con clinómetro Suunto y huincha de distancia y la medición del largo total (altura medida) se realizó con huincha de distancia. Si bien conceptualmente la longitud fustal total no corresponde a la altura total (diferencia de cota entre el ápice y el suelo) se asume que la primera representa bien la verdadera altura total.

Las estadísticas de las mediciones son las siguientes:

Variable	Altura estimada	Altura medida
Promedio (m)	17,1	16,7
Desviación estándar (m)	4,6	3,5
Coefficiente de variación (%)	27	20,8

La diferencia entre la altura estimada y la altura medida fue en promedio de 0,37 m con una desviación estándar de 2,71 m. Estas diferencias evaluadas en valor absoluto alcanzan a 2,1 y 1,8 m, respectivamente.

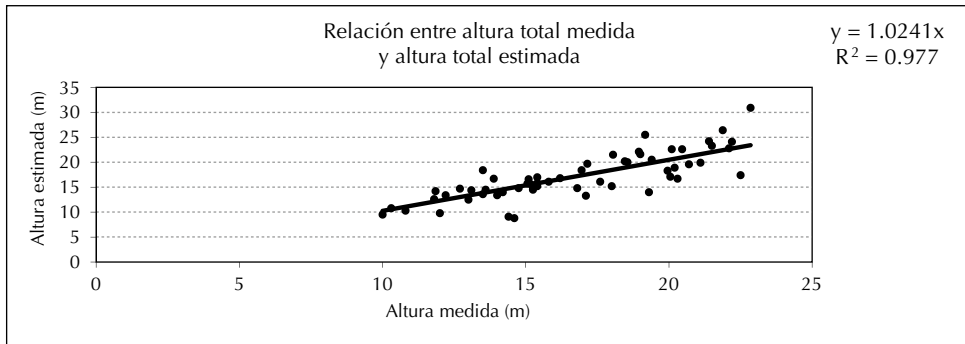
Para verificar que los estimadores de altura total se relacionan linealmente con la altura medida, se ajustó el modelo:

$$H_{est} = \alpha * H_{med} \tag{2}$$

El ajuste por mínimo cuadrado revela que el coeficiente α es 1,0241 con un error estándar de 0,0208 el que tiene una probabilidad de rechazo $<2e-16$, altamente significativo y con residuos no significativamente diferente de 0.

El coeficiente de determinación del modelo es 0,977 con un error residual de 2,7 m.

La gráfica es la siguiente:



Si bien la estimación resulta insesgada para el conjunto de datos, la gráfica indica que en los valores extremos se produce una sobreestimación de altura.

Considerando que el *site form* se determina con la medición de alturas para un DAP clave, se evaluó el residuo entre la altura estimada y la altura medida para árboles bajo y sobre 30 cm de DAP. El resultado señala que en promedio los desvíos alcanzan a 0,3 m con una desviación estándar de 2,3 m para árboles bajo 30 cm y 1,0 y 4,9 m para aquellos sobre 30 cm de DAP, respectivamente. Las mismas diferencias evaluadas en valor absoluto alcanzan a 1,8 y 1,5 m, para los árboles bajo 30 cm de DAP y 4,0 y 2,6 m para los árboles sobre 30 cm de DAP, en ese mismo orden.

En síntesis, la estimación de alturas con clinómetro si bien resulta insesgada para el conjunto de datos, presenta problemas en aplicaciones a nivel de árboles individuales. La desviación estándar de los residuos muestra valores completamente inaceptables para su uso en estimación de sitio usando el concepto de *site form*, razón por la que se ha desechado esta forma de cuantificación en renovales de roble. Los residuos que en promedio superan 2 m resultan muy superiores a los rangos requeridos para una adecuada clasificación de sitio bajo el concepto de *site form*.

Referencias

- Bailey, R. & Brooks, J. 1994. Determining site index and estimating timber volumes without measuring heights. *Southern Journal of Applied Forestry*. 18(1):15-18.
- Corvalán, P. 2015. Determinación de *site form* para renovales de roble en la precordillera andina de la Región del Maule basado en una ecuación generalizada altura-diámetro. Informe proyecto FIBN 046/2013.

- Huang, S & Titus, S. 1993. An index of site productivity for uneven-aged or mixed species stands. *Can. J. For. Res.* 23:558-562.
- Larjavaara, M. & Muller, H. 2013. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*.
- St-Onge, B.; Jumelet, J.; Cobello, M. & Véga, C. 2004. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. *Canadian Journal of Forest Research*. 34(10):2122-2130.
- Vanclay, J. & Henry, N. 1988. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland. *The Commonwealth Forestry Review*. 53-64

