



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA

CRECIMIENTO DE UN BOSQUE SECUNDARIO DE *Nothofagus macrocarpa*, EN EL CERRO EL ROBLE, REGIÓN METROPOLITANA

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CAROLINA TERESA DELGADO FLORES

Profesores Guías: Ing. Forestal, Dr. Sergio Donoso Calderón
Ing. Forestal, Dr. Karen Peña Rojas

Santiago, Chile

2008

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA

CRECIMIENTO DE UN BOSQUE SECUNDARIO DE *Nothofagus macrocarpa*, EN EL CERRO EL ROBLE, REGIÓN METROPOLITANA

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CAROLINA TERESA DELGADO FLORES

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Srta. Karen Peña Rojas	7,0
Prof. Guía Sr. Sergio Donoso Calderón	7,0
Prof. Consejero Sr. Juan Caldentey Pont	6,7
Prof. Consejero Sr. Rodolfo Gajardo Michell	6,8

*A mi mamá y mis hermanas
A mi abuelita Cruz y mi tata Julio
Les dedico este trabajo, porque confiaron en mí.*

AGRADECIMIENTOS

Sin duda, lograr dar término a este proceso, no es fácil. Es por ello que considero que es importante poder agradecer a quienes aportaron en esta investigación y a quienes no, pero que de una u otra forma me apoyaron.

En primer lugar, a mi mamá por su amistad, sus consejos y por todo el esfuerzo que ha hecho para sacarnos adelante a mi y a mi hermanita. A ti también Cami, por la paciencia que me tuviste durante muchos años. Las quiero mucho.

Agradezco a mis profesores guías, Karen Peña y Sergio Donoso, quienes confiaron en mí y en mis capacidades, y me dieron la posibilidad de desarrollarme profesionalmente. Gracias por el apoyo que me brindaron en todo momento, por los consejos, la motivación y todas las revisiones, que permitieron que al fin, terminara esta memoria.

A mis profesores consejeros, muchas gracias por la rapidez de sus revisiones, y por todas las sugerencias que formaron parte importante de este trabajo.

Al financiamiento otorgado por el proyecto FONDECYT N°1061100, "Efecto de las intervenciones silvícolas sobre: el desarrollo, relaciones hídricas y eficiencia en la conversión de energía radiante en vástagos de *Nothofagus macrocarpa*, ubicados en la zona de Cerro El Roble, Provincia de Chacabuco.

A don Juvenal (Caleu), David Ilabaca y Aldo Aguirre, por el trabajo en terreno. A todos los que me ayudaron en el procesamiento de las muestras, don Erick, Pato, don José, tía pH y Lucho Frías (Q.E.P.D).

Como no darles las gracias a mis compañeros, Marife, Coto, Camila, Tania, Ana, David, Gonzalo, Mafla, Jaimón, Andrés, Alvarao, y a todos los que se me quedan en el tintero. Gracias por los años de amistad, estudio y diversión.

Y finalmente a mi compañero y amigo, al amor de mi vida, Marcelo Ramos, por la compañía, la paciencia y toda la motivación y perseverancia que me dio permanentemente. Por nuestros sueños, que tarde o temprano, llegarán a ser realidad.

ÍNDICE

RESUMEN

SUMMARY

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Antecedentes generales de roble de Santiago.....	3
2.1.1 Descripción general.....	3
2.1.2 Distribución y hábitat.....	3
2.1.3 Estado de conservación.....	4
2.2 Crecimiento en <i>Nothofagus</i>.....	5
2.2.1 Crecimiento en diámetro.....	5
2.2.2 Crecimiento en altura.....	6
2.3 Antecedentes generales de volumen.....	7
2.3.1 Funciones de volumen.....	7
2.3.2 Algunas funciones de volumen para el género <i>Nothofagus</i>	8
3. MATERIAL Y MÉTODO.....	10
3.1 Material.....	10
3.1.1 Ubicación geográfica.....	10
3.1.2 Clima.....	10
3.1.3 Suelo.....	11
3.1.4 Vegetación.....	11
3.2 Método.....	12
3.2.1 Cosecha y almacenamiento de las muestras.....	12
3.2.2 Estructura de edad.....	13
3.2.3 Crecimiento en diámetro y altura.....	13
3.2.4 Ajuste de función local de volumen.....	13
3.2.5 Productividad en volumen.....	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
4.1 Descripción del rodal.....	16
4.1.1 Estructura del rodal.....	16
4.1.2 Estructura del renoval.....	17
4.2 Crecimiento de los vástagos del renoval.....	19
4.2.1 Incremento en altura.....	19

4.2.2 Incremento en diámetro.....	21
4.3 Volumen.....	23
4.3.1 Función de volumen.....	23
4.3.2 Productividad en volumen.....	25
5. CONCLUSIONES.....	27
6. BIBLIOGRAFÍA.....	28
APENDICES.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista general del cerro El Roble.....	10
Figura 2: Dispersión diamétrica de los vástagos, en el área de estudio.....	12
Figura 3: Relación altura-edad de los vástagos.....	20
Figura 4: Distribución de residuos para el modelo 3.....	24
Figura 5: Relación DAP (cm) – productividad media anual en volumen a nivel de individuos (m ³ /año/individuo).....	26

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Funciones de volumen para el género <i>Nothofagus</i>	9
Cuadro 2: Antecedentes dasométricos del área de estudio.....	17
Cuadro 3: Distribución de DAP y alturas por clases diamétricas.....	17
Cuadro 4: Distribución de edades por clases diamétricas.....	18
Cuadro 5: Incremento medio anual en altura (IMAA) y crecimiento de los últimos 2 años por clases diamétricas para el área de estudio.....	19
Cuadro 6: Incremento medio anual en diámetro (IMAD) e incremento periódico anual (IPAD) por clases diamétricas para el área de estudio.....	21
Cuadro 7: Funciones de volumen ajustadas para <i>N. macrocarpa</i> , y parámetros de selección.....	23
Cuadro 8: Validación del modelo 2, utilizando la submuestra.....	25
Cuadro 9: Productividad a nivel de individuos.....	25

RESUMEN

Los bosques de *Nothofagus macrocarpa* (roble de Santiago o roble blanco), se establecieron hace miles de años, en condiciones climáticas muy distintas a las actuales. Hoy estos bosques tienen una reducida distribución geográfica y existen muy pocos antecedentes respecto al desarrollo de esta especie.

El estudio, evaluó el crecimiento de un bosque secundario de *N. macrocarpa*, ubicado en el Santuario de la Naturaleza Cerro El Roble (Región Metropolitana). Se localizaron tres sectores cercanos entre sí y se cosecharon 240 vástagos. A todos los vástagos se les extrajo la rodela basal y se determinó la edad y la estructura de edad del bosque. De una submuestra de 63 vástagos, se obtuvieron rodelas cada un metro, más la rodela a la altura del DAP (1,3 m). De la información obtenida de las rodelas, se calculó el incremento medio anual en diámetro y altura. Finalmente, se cubicaron los vástagos y se ajustó una función local de volumen.

Los resultados indican que el bosque presenta una estructura de monte bajo irregular, con una alta rebrotación, pudiendo encontrarse hasta 11 vástagos por cepa. La edad promedio del bosque es de 39 años, con edades mínimas y máximas de 10 y 64 años, respectivamente. La heterogeneidad de edades se presenta a nivel del bosque y también a nivel de cepa. El bosque presenta un incremento medio anual en altura de 32 cm/año. El incremento medio anual en diámetro obtenido fue de 0,18 cm/año. Estos valores son inferiores a los encontrados en otras especies del género *Nothofagus*, como roble y raulí. Pero son similares a los reportados para hualo.

Se concluye que luego de la corta o pérdida del fuste, el roble de Santiago presenta una producción de brotes durante varios años. Esto se ve reflejado por la alta variabilidad de edad de los vástagos dentro de las cepas. El bosque presenta una baja tasa de crecimiento en diámetro y altura, pues las condiciones ambientales y la estructura del bosque, incidirían en los niveles de competencia por luz y agua, entre vástagos.

SUMMARY

Nothofagus macrocarpa (roble de Santiago or roble blanco) forests exist since thousands of years, living under completely different climate conditions from the present situation. Today these forests are very restricted in distribution across the country and there is not enough information and background about this species yet.

This research evaluated the growth of a secondary growth forest of *N. macrocarpa*, located in Cerro El Roble (Metropolitan area, Santiago of Chile). There was identified three areas near by where 240 sprouts were collected. From everyone of them was taken the trunk disc in order to determinate the age of each sprouts and the forest age structure. From a sub sample of 63 sprouts, trunk discs were obtained each meter plus one disc at 1,3 mt high from the bottom of every sprout sub sample. This material was used in order to determine the mean annual increment in diameter and height. Besides, a local volumetric function was adjusted.

Results show that the forest studied has a coppice uneven aged structure, with a high regeneration up to 11 sprouts by stump. Average forest age is 39 years, with a minimum of 10 and maximum of 64. The aged heterogeneity is showed at the level of the stand and sprouts by stump. The forest shows a mean annual increment in height is 32 cm/yr and in diameter is 0,18 cm/yr. These values are lower than others found in *Nothofagus* species such as roble and raulí, nevertheless are similar to those informed previously for hualo.

It is concluded that after the cut or loss of the stem, roble de Santiago presents a production of sprouts during various years. This is reflected by the high variability of age of the sprouts within stumps. The forest presents a low growth rate in diameter and height, therefore the environmental conditions and the structure of the forest, they would impact in the levels of competence by light and water, among sprouts.

1. INTRODUCCIÓN

El bosque nativo ha sido degradado y explotado de manera irracional durante muchos años. Prácticas como el floreo y la extracción de leña, han producido un deterioro progresivo de nuestros bosques. La oportunidad que tenga el bosque nativo de conservarse y recuperarse, dependerá de las decisiones que se tomen, en base a estudios de sus condiciones actuales.

En Chile, algunas especies nativas del género *Nothofagus*, han sido en este sentido ampliamente estudiadas. Es así como en lenga (*Nothofagus pumilio*), raulí (*Nothofagus alpina*), roble (*Nothofagus obliqua*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*), se han efectuado numerosos estudios respecto al crecimiento que presentan, en condiciones naturales o en plantaciones. A partir de ello se han establecido métodos silviculturales, que permiten desarrollar un manejo sustentable de las especies, y en algunos casos, establecer planes de recuperación, restauración o conservación.

Una situación distinta, presenta actualmente el roble de Santiago (*Nothofagus macrocarpa*), especie reconocida hace poco tiempo como tal y con escasa información disponible sobre su desarrollo y funcionamiento.

En el Santuario de la Naturaleza Cerro El Roble (Comuna de Til Til, Región Metropolitana), es posible encontrar el roble de Santiago, el cual fue fuertemente explotado en las últimas décadas, produciéndose una degradación de los bosques ahí presentes. En el año 2005, se propuso un Plan de Manejo Participativo en la Comunidad de Caleu, incentivando e implementando iniciativas sustentables en la formación boscosa, a través de distintos programas. Esta es una de las escasas actividades relacionadas con esta especie arbórea, puesto que involucra la conservación y recuperación de sus bosques, que para la comunidad del lugar poseen un alto valor.

Este estudio entrega los primeros antecedentes sobre el desarrollo y funcionamiento de los bosques de *N. macrocarpa*, en el Cerro El Roble. Los resultados obtenidos, permitirán establecer acciones tendientes a la conservación y recuperación de esta especie.

El objetivo general de este estudio es evaluar el crecimiento de un bosque secundario de *Nothofagus macrocarpa*, en el Cerro El Roble, Región Metropolitana.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar dasométricamente y analizar la estructura de edad de los vástagos presentes en el bosque estudiado.
- Analizar el crecimiento en altura y diámetro mediante análisis de tallo.
- Generar una función local de volumen y estimar la productividad en volumen de los árboles del sector.

Este estudio se insertó en el marco del proyecto FONDECYT N°1061100: “Efecto de las intervenciones silvícolas sobre: el desarrollo, relaciones hídricas y eficiencia en la conversión de energía radiante en vástagos de *Nothofagus macrocarpa*, ubicados en la zona de Cerro El Roble, Provincia de Chacabuco”.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes generales de roble de Santiago

Los bosques de roble de Santiago (*Nothofagus macrocarpa*), pertenecen a la región del Bosque Caducifolio, sub-región del Bosque Caducifolio Montano, en la formación denominada Bosque Caducifolio de Santiago (Gajardo, 1994). Según Donoso (1993), pertenece el tipo forestal roble-hualo, sub-tipo Bosques Costeros Septentrionales de roble o hualo.

2.1.1 Descripción general

El roble de Santiago, ha sido considerado durante mucho tiempo como una variedad de la especie *Nothofagus obliqua*, denominada como *N. obliqua* var. *macrocarpa*. Estudios en la nomenclatura y sistemática del género *Nothofagus* en Chile, establecieron el cambio de nivel taxonómico de esta especie, pasando a llamarse *N. macrocarpa* (Vásquez y Rodríguez, 1999). Los mismos autores señalan que *N. macrocarpa* presenta aspectos morfológicos que lo relacionan más con *N. alpina*, que con *N. obliqua*.

Marticorena y Rodríguez (2003), describen a *N. macrocarpa* como un árbol que puede alcanzar alturas de hasta 25 m, frondoso, de follaje de color verde claro. El tronco es más o menos cilíndrico, recto, de hasta 1,2 m de diámetro, corteza gruesa en árboles adultos y lisa y cenicienta en árboles jóvenes. Las ramas son gruesas, con yemas de 0,5-0,7 mm de largo. Hojas caducas, simples, alternas, de 4-9 cm de largo, aovadas o elípticas, romas o algo agudas en el ápice, base cuneada, asimétrica, cara inferior de la lámina piloso-glandulosa, pecíolo y vainas primarias con pelos ferrugíneos, margen ondulado-crenado, dentado. Flor masculina solitaria, axilar, pedicelada, perigonio más o menos piloso. Inflorescencias femeninas trifloras, sobre pedúnculos de 2-3 mm de largo. Cúpula pilosa, 4-partida, de 1,5-2,2 cm de largo; apéndices lamelares intrincados, divididos, glandulosos-ciliados. Nueces de 8-11 mm de largo, la central bialada, las laterales triangulares, trialadas.

2.1.2 Distribución y hábitat

N. macrocarpa es una especie endémica de Chile y es considerada como la más septentrional dentro del rango de distribución del género en América (Ormazábal y Benoit,

1987). Presenta un área de distribución muy restringida, encontrándose desde la Provincia de Valparaíso (32°57´ S), hasta la Provincia de Colchagua (34°51´ S). En los cerros de ambas cordilleras se distribuye desde los 800 hasta los 2200 m de altitud (Marticorena y Rodríguez, 2003).

La superficie ocupada por la especie, es de 7.060 ha aproximadamente, aunque esta cifra podría ser superior, puesto que sólo considera algunos sectores de la V Región y no contempla los bosques de roble de Santiago de la VI Región (Ormazábal y Benoit, 1987).

N. macrocarpa ha sido considerada como una especie relictica. Es decir, las poblaciones de esta especie, se establecieron hace miles de años atrás en condiciones climáticas muy distintas a las actuales, representando así una muestra muy compleja de lo que ha sido la dinámica natural de la vegetación en esta área (Gajardo, 2001).

2.1.3 Estado de conservación

En la actualidad el roble de Santiago, no está incluido dentro del listado nacional de especies arbóreas y arbustivas clasificadas en algún estado de conservación. Pero se señala que la especie (*Nothofagus obliqua* var. *macrocarpa*), podría ser considerada como una especie con problemas de conservación, catalogada como “en peligro” en la V Región, y “vulnerable” en la Región Metropolitana (Benoit, 1989).

Según Gajardo (2001), *N. macrocarpa* debería ser declarada como especie en peligro, dada las condiciones actuales en que se encuentran sus poblaciones, muy aisladas unas de otras, sometidas a fuertes presiones ambientales y antrópicas, y sin manifestaciones de una real dinámica regenerativa.

N. macrocarpa es una especie escasamente representada en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). Las formaciones de roble de Santiago protegidas corresponden sólo a un 2,7% de su superficie total, es decir en 191,5 ha, que se encuentran localizadas en el Parque Nacional La Campana. (Ormazábal y Benoit, 1987).

La zona de El Roble, de 88.520 ha que se ubican en las comunas de Tiltil, Lampa, Pudahuel, Maipú, Padre Hurtado y Curacaví, y que considera en su extremo norte el

Cerro El Roble, ha sido considerada como un Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago. La especie más emblemática de este sitio, es roble de Santiago (CONAMA, 2004).

El Libro Rojo de los Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica en Chile, señala que la zona del Cerro El Roble, debe ser protegida debido al estado de conservación que actualmente tiene, y por los recursos que alberga. Como medida, se sugiere la ampliación del Parque Nacional La Campana, hacia la zona de Caleu, con el fin de ampliar la protección de las roblerías más septentrionales del país. Se señala a *N. obliqua* var. *macrocarpa*, como una especie de interés para el área (Muñoz *et al*, 1996)

2.2 Crecimiento en *Nothofagus*

En la actualidad no existen antecedentes de crecimientos en altura y diámetro del roble de Santiago, por lo cual se hará referencia a otras especies del género, que han sido ampliamente estudiadas en nuestro país.

2.2.1 Crecimiento en diámetro

Se han desarrollado diversos estudios de crecimiento diametral en renovales de roble y raulí, utilizando diversos métodos. Los resultados señalan que el roble presenta crecimientos cercano a 0,5 cm/año y el raulí puede alcanzar crecimientos próximos a 0,8 cm/año (Donoso, 1988; Donoso *et al*, 1993a; Echeverría y Lara, 2004).

En las comunas de Panguipulli y Curarrehue, se llevaron a cabo estudios en renovales raleados de roble y raulí, y se evaluó el crecimiento diametral antes de la realización de las intervenciones. Los resultados indican que, en los 10 primeros años, las tasas de crecimiento en diámetro de los renovales son relativamente bajas con un promedio de 0,55 cm/año, Los valores en el período de 11 a 20 años ascienden, alcanzando 0,81 cm/año en promedio. A partir del año 21, ya no es posible obtener valores de crecimiento diametral sin manejo, pues ese año los renovales fueron intervenidos. Dentro de este estudio es importante destacar dos predios, Puñir, localizado en exposición sureste, el cual presenta un 88% de roble y donde los crecimientos diametrales son 0,69 cm/año en promedio; y el predio Casas Viejas 2 que está compuesto en su totalidad por raulí y

ubicado en exposición suroeste, donde el promedio de crecimiento en diámetro fue de 0,9 cm/año (Donoso *et al*, 1993a).

En el área de protección “Radal Siete Tazas” ubicada en la Provincia de Curicó, Donoso (1988), estimó en un rodal de roble-raulí de 47 años, crecimientos diametrales de 0,62 cm/año y 0,73 cm/año respectivamente. En este mismo rodal el crecimiento anual periódico, para los últimos 10 años, fue de 0,46 cm/año y 0,58 cm/año. Para un rodal de roble puro de 37 años, el mismo autor encontró valores de 0,48 cm/año de crecimiento medio anual diametral y de 0,42 cm/año para el último período de 10 años.

Echeverría y Lara (2004), analizaron diferentes clases de sitio en bosques secundarios de roble-raulí en las provincias de Cautín y Valdivia. Los autores indican que los mayores incrementos periódicos anuales (IPA) en diámetro, para el período de los 15 a los 20 años, se obtienen en sitios cercanos a la Cordillera de los Andes, caracterizados por un período libre de heladas de 51 a 150 días, período seco de máximo 1 a 2 meses y donde el contenido de arcilla de los suelos es entre 22 y 45%. El valor de IPA en diámetro obtenido en esta clase de sitio fue en promedio de 0,75 cm/año. En cambio, el menor IPA en diámetro (0,54 cm/año), se obtiene en la clase de sitio ubicada en la depresión intermedia del área de estudio. Allí, el período seco es mayor, de 5 a 6 meses, presenta la mas baja precipitación e índice de humedad estival (entre 700 y 1.300 mm y 0,4 a 0,5, respectivamente), y el período libre de heladas es entre 51 a 150 días.

2.2.2 Crecimiento en altura

En Chile algunos estudios en bosque nativo, muestran el crecimiento en altura acumulado a los 20 años, como un indicador del sitio (Donoso, 1988; Donoso *et al*, 1993b; Castillo, 1992). Además, existen algunos antecedentes del incremento medio anual en altura, en especies del género *Nothofagus*.

Donoso *et al* (1993b), desarrollaron un estudio de renovales de roble y raulí, en 40 localidades entre la VII y X Región. Los resultados muestran que en las distintas zonas de crecimiento propuestas por dichos autores, el roble presenta incrementos anuales en altura entre 0,44 m/año y 0,81 m/año. El crecimiento acumulado en altura a los 20 años es de alrededor 10 m para renovales puros de roble, ubicados en la VII Región, que tenían en promedio cerca de 40 años.

El raulí en cambio, presenta incrementos en altura anuales entre 0,33 m/año y 0,73 m/año, en las diferentes zonas de crecimiento. El crecimiento en altura acumulado a los 20 años de edad es de 13 m aproximadamente, para renovales de la VII Región, de cerca 50 años de edad. Las diferencias entre ambas especies, estarían representadas por variaciones climáticas entre las zonas de crecimiento donde se desarrollan dichas especies, principalmente en los montos de precipitación anual, la duración del período seco y los niveles de temperatura durante el período vegetativo (op. cit.).

En el área de Radal Siete Tazas, el crecimiento en altura acumulado a los 20 años, es de 9,6 m para el roble y 12,1 m para el raulí. El crecimiento medio anual en altura varió entre 0,36 y 0,58 m/año, en los distintos rodales analizados (Donoso, 1988).

2.3 Antecedentes generales de volumen

La estimación del volumen del árbol individual es de gran importancia. La determinación directa mediante cubicación de secciones, presenta ciertas dificultades, por lo cual es necesario contar con expresiones matemáticas que, basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitan estimar el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples. El contenido volumétrico del fuste se considera función de las variables diámetro a la altura del pecho (D), altura total (H) y algunas expresiones de la forma (f) (Prodan *et al*, 1997).

$$v = f(D,H,f)$$

2.3.1 Funciones de volumen.

Las funciones de volumen más utilizadas, son las llamadas funciones locales y funciones generales de volumen. Estas últimas, estiman el volumen utilizando dos o más variables, usualmente diámetro, altura y en ocasiones una expresión de la forma del fuste. La relación diámetro/altura está explícita dentro de la función, por lo cual estos modelos pueden aplicarse para edades y sitios diversos (Prodan *et al*, 1997).

Según lo indicado por los mismos autores (op. cit.), las funciones locales son aquellas que relacionan el volumen del árbol con sólo una variable dependiente, generalmente el diámetro a la altura del pecho o transformaciones y potencias de éste. Son funciones locales debido a que su aplicación está limitada al área para la cual es aplicable la relación diámetro/altura, implícita en el modelo de volumen. Los modelos de volumen local son simples y algunos de ellos son:

$$v = b_0 * D^{b_1}$$

$$v = b_0 + b_1 * D^2$$

$$v = b_0 + b_1 * D + b_2 * D^2$$

$$v = b_0 + b_1 * g^2$$

Donde, V: volumen (m³), D: diámetro a la altura del pecho (cm), g: área basal (cm²)

Para la construcción de un modelo de volumen, se utiliza el análisis de regresión, como un método estadístico de estimación. Este consiste en la dependencia estadística entre la(s) variable(s) explicativa y la dependiente, con el objeto de estimar el valor medio de la segunda en términos de valores conocidos fijos de la(s) primera. Esta dependencia es realizada mediante ajuste de la curva, por el Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios, entre la variable explicativa (DAP) y la dependiente (volumen), lo que da la ecuación más verosímil de la curva y por consiguiente la estimación más probable. La curva que se ajusta con este método resulta ser aquella en que la suma de los residuos elevados al cuadrado es menor. Por lo tanto, permitirá el error normal más pequeño posible en el cálculo (Flández, 1998)

2.3.2 Algunas funciones de volumen para el género *Nothofagus*

En el cuadro 1 se exponen algunos modelos propuestos para especies del género *Nothofagus*. La mayoría de las funciones locales de volumen encontradas, corresponden a mediciones realizadas en renovales o bosques secundarios, a excepción de los modelos expuestos por Gutiérrez (2004), quién ajustó funciones locales en plantaciones de *N. obliqua* y *N. alpina*, establecidas entre los años 1962 y 1970.

Cuadro 1: Funciones de volumen para el género *Nothofagus*

Modelo (v: volumen en m³, D: DAP en cm)	Aplicación	Autor
$v = 0,000488054 * D^{2,18085}$	Plantaciones de <i>N. obliqua</i> , Frutillar	Gutiérrez, 2004
$v = 0,000406074 * D^{2,19724}$	Plantaciones de <i>N. alpina</i> , Frutillar	Gutiérrez, 2004
$v = 0,00037605 * D^{2,17940559}$	Renovales de <i>N. betuloides</i> , Tierra del Fuego	Pastur <i>et al</i> , 2002
$v = 0,3939 - 0,03501 * D + 0,00142 * D^2$	Renovales de <i>N. glauca</i> , Constitución	Pérez y Rojas, 1991
$v = -0,03695309 + 0,00075407 * D^2$	Renovales de <i>N. obliqua</i> , Panguipulli	Grosse, 1989
$v = 0,03655 * 0,00002 * D^3$	Renovales de <i>N. alpina</i> , Panguipulli	Cubillos, 1988
$v = 6,02959 * 10^{-5} * D^{2,762815}$	Renovales de <i>N. obliqua</i> y <i>N. alpina</i> , Radal 7 Tazas	Donoso, 1988

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Material

3.1.1 Ubicación geográfica

El presente estudio fue realizado en el Cerro El Roble ($32^{\circ} 58' S - 71^{\circ} 01' O$), ubicado en la localidad de Caleu, Comuna de Til Til, situado a 75 km aproximadamente de Santiago (Figura 1). Fue declarado Santuario de la Naturaleza en el año 2000, bajo el Decreto Exento 229 del Ministerio de Educación (Chile, 2000). El Santuario posee una superficie de 996,1 ha, y se encuentra localizado en el límite noroeste de la Región Metropolitana, colindando hacia el oeste con el Parque Nacional La Campana (V Región de Valparaíso, Provincia de Quillota).

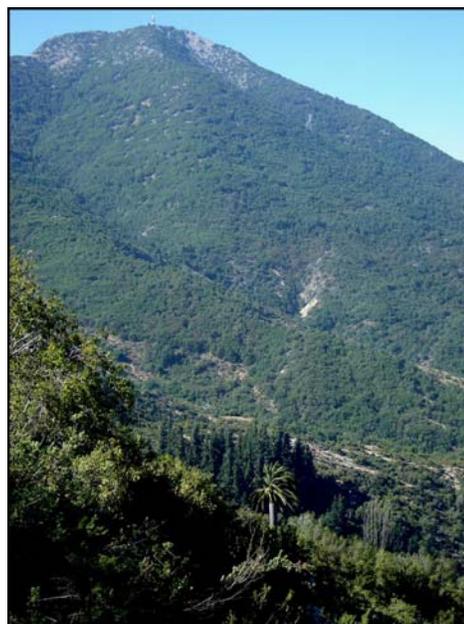


Figura 1: Vista general del Cerro El Roble

Esta área, a pesar de estar bajo protección, no se encuentra incluida en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas SNASPE. Actualmente, la administración del Santuario se encuentra a cargo de la Asociación de Comuneros de la Capilla de Caleu. El área de estudio se encuentra ubicada entre los 1.600 y los 1.800 msnm, en una exposición sur-sureste.

3.1.2 Clima

Santibáñez y Uribe (1990), señalan que el Cerro El Roble presenta un clima tipo Templado Mesotermal Inferior Estenotérmico Mediterráneo Semiárido, ubicado en el distrito agroclimático 50.2. Éste se caracteriza por poseer temperaturas medias del clima, que varían entre los $26,5^{\circ} C$, como máxima en enero, y una mínima en julio de $1,7^{\circ} C$. El número de días con posibilidades de heladas es 187. El régimen hídrico tiene una

precipitación media anual de 656 mm, un déficit hídrico medio anual de 812 mm y un período seco de 7 meses. Este distrito se encuentra ubicado en una altitud moderada, lo que determina una buena ventilación que produce veranos frescos e inviernos moderadamente fríos.

Luebert y Pliscoff (2006), incluyen la vegetación de esta zona dentro de los pisos bioclimáticos mesomediterráneo superior subhúmedo inferior hiperoceánico y supramediterráneo inferior subhúmedo superior y húmedo inferior oceánico.

3.1.3 Suelo

Los suelos han sido descritos como suelos evolucionados, derivados de rocas graníticas, moderadamente profundos a profundos, de textura franco arcillo arenoso en la superficie y arcillosa en profundidad. El sustrato está constituido por rocas graníticas descompuestas. La profundidad efectiva del suelo varía entre 50 y 120 cm (Espinosa, 2002).

3.1.4 Vegetación

Luebert y Pliscoff (2006), indican que los bosques de Roble de Santiago, pertenecen al piso vegetacional denominado Bosque Caducifolio Mediterráneo costero de *Nothofagus macrocarpa* y *Ribes punctatum*.

El Santuario de la Naturaleza Cerro El Roble está conformado por siete comunidades vegetacionales. Sin embargo, el área donde se desarrolló esta investigación está inserta sólo dentro de una de ellas, el Bosque Caducifolio de Roble, caracterizado por la presencia mayoritaria de *N. macrocarpa* (Espinosa, 2002).

Los bosques de Roble de Santiago poseen una estrata arbórea dominada por *Nothofagus macrocarpa*, una estrata arbustiva donde destacan *Ribes punctatum*, *Berberis actinacantha*, *Calceolaria meyeniana*, *Azara petiolaris* y algunos elementos esclerófilos, y una estrata herbácea caracterizada por la presencia de *Adiantum sulphureum* y *Alstroemeria zoellneri* (Luebert y Pliscoff, 2006; Espinosa, 2002)

3.2 Método

3.2.1 Cosecha y almacenamiento de las muestras

El área de estudio abarcó tres zonas, donde la estructura correspondía a un bosque secundario de *N. macrocarpa*. Estas tres zonas estaban localizadas en exposición sur-sureste, y presentaban una cobertura arbórea de aproximadamente 70%. El área de estudio fue caracterizada dasométricamente, el año 2006, a través de tres parcelas de inventario de aproximadamente 0,05 ha por zona. La muestra de vástagos fue seleccionada a partir de la dispersión diamétrica que presentaron los vástagos del área de estudio (Figura 2).

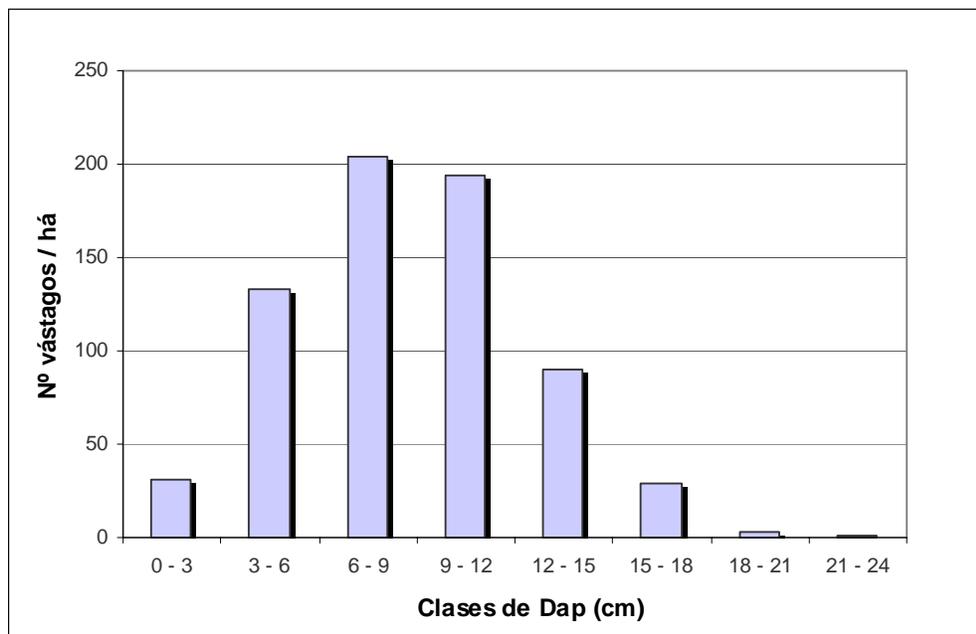


Figura 2: Dispersión diamétrica de los vástagos, en el área de estudio

Se cosecharon 80 vástagos por zona, de los que se obtuvo la rodela basal. Dentro de esta muestra, a 21 árboles por sector se les extrajo adicionalmente rodela cada 1 m a lo largo de los fustes, y la rodela a la altura del DAP (1,3 m). A cada una de las rodela, se les marcó el norte, de modo de hacer las lecturas posteriores en un mismo sentido. Todas las muestras fueron almacenadas, rotuladas y transportadas en sacos, a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile para su posterior procesamiento.

A todas las rodela se les midió el diámetro utilizando una huincha diamétrica, con lo cual se obtuvo el diámetro medio. Luego fueron secadas a temperatura ambiente durante aproximadamente cinco días. Cuando las muestras ya se encontraban secas, fueron pulidas en una máquina lijadora, lo que permitió facilitar las mediciones posteriores en los anillos de incremento.

3.2.2 Estructura de edad

Para identificar la estructura de edad del bosque, se contó el número de anillos desde la corteza a la médula, de todas las rodela basales (240 rodela en total). En una de las zonas de muestreo, las rodela basales extraídas fueron identificadas de acuerdo al número de cepa, de modo de poder analizar la distribución de edades al interior de cada cepa. A partir de la toda la información obtenida, se analizó la estructura de edad de los vástagos y de las cepas.

3.2.3 Crecimiento en diámetro y altura

La muestra para realizar el análisis de crecimiento, constó de 63 árboles, distribuidos según clase de diámetro, considerando las tres zonas (21 árboles por zona), y cubriendo todo el rango de dispersión diamétrica (Figura 2). A todos los árboles se les midió el DAP, la altura total y el incremento en altura de los últimos 2 años, medido en las cicatrices dejadas por las yemas apicales. La evaluación del crecimiento se efectuó mediante análisis de tallo. Para estimar el incremento medio anual en altura (IMAA), se utilizó el número de anillos de las rodela sucesivas y la distancia entre dichas rodela.

Para medir el incremento medio anual en diámetro (IMAD), se utilizó la rodela a la altura del DAP de todos los vástagos cosechados. Con la ayuda de un dendrómetro se midió el incremento de todos los anillos, desde la corteza hacia la médula, es decir el espesor de cada anillo. Esta lectura se realizó en el norte marcado en las rodela, y luego los valores obtenidos fueron ajustados al diámetro medio.

3.2.4 Ajuste de función local de volumen

Para ajustar la función de volumen, se cubicaron las rodela de los 63 vástagos, utilizando la fórmula de Smalian:

$$v = l * \frac{g_i + g_{i+1}}{2}$$

donde: l corresponde a la distancia entre rodela sucesivas, y
g al área basal de cada rodela (i = n° de rodela)

Se utilizaron los volúmenes de los árboles hasta un diámetro mínimo de 3,7 cm, valor derivado del diámetro mayor obtenido en la última rodela, considerando todas las muestras. Puesto que existían árboles muy pequeños, que no tenían rodela de diámetro mayor a 3,7 cm, fue necesario eliminar algunos individuos del ajuste. De esta manera se dispuso de 57 vástagos. Para el ajuste de las funciones, se utilizaron 50 individuos, y siete vástagos elegidos al azar, fueron usados en la validación del modelo seleccionado. Para la construcción de la función de volumen se utilizaron los antecedentes de DAP y volumen según Smalian, de todos los vástagos.

La información fue procesada utilizando el programa STATGRAPHICS PLUS versión 2.1, y los modelos probados fueron los siguientes:

Nº	Modelo
1	$v = b_0 * D^{b_1}$
2	$v = b_0 + b_1 * D^2$
3	$v = b_0 + b_1 * D + b_2 * D^2$
4	$v = b_0 + b_1 * g^2$

v = volumen en m³; D = DAP en cm; g = área basal en cm²

Los modelos expuestos fueron ajustados mediante el Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios, que busca minimizar la suma de cuadrados de las diferencias existentes entre los puntos del diagrama de dispersión (Montgomery, 1991; Ostle, 1968).

Para seleccionar el modelo de estimación del volumen, se utilizaron los siguientes criterios:

- Mayor coeficiente de determinación (r^2)
- Menor error estándar de estimación (S_{XY})
- Análisis de residuos (análisis de los residuos estandarizados versus las variables descriptoras), mediante el método de Park

Una vez seleccionado el modelo de mejor ajuste, se procedió a su validación, calculando a partir de la submuestra, el error cuadrático medio de las desviaciones.

3.2.5 Productividad en volumen

La productividad en volumen fue evaluada utilizando los antecedentes de volumen y edad de los 57 vástagos individualizados. De esta manera se obtuvo la productividad en $\text{m}^3/\text{año}$ a nivel de individuos. Adicionalmente se obtuvo la productividad media para el área de estudio ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$), utilizando la función local de volumen y el incremento periódico anual en diámetro de los últimos 5 años.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción del rodal

El estudio se realizó en un bosque secundario o renoval de *Nothofagus macrocarpa*. El bosque ha sido intervenido en las últimas décadas, principalmente para extracción de madera con fines energéticos (leña y carbón). Actualmente los árboles presentan una estructura de monte bajo, por lo cual es posible encontrar una serie de vástagos sobre un tocón o cepa. En el área de obtención de las muestras no se observan individuos del bosque primario.

El dosel superior está dominado principalmente por *Nothofagus macrocarpa*. Las especies arbustivas y herbáceas acompañantes son: *Maytenus boaria*, *Schinus montanus*, *Ribes punctatum*, *Calceolaria meyeniana*, *Baccharis neaei*, *Mutisia latifolia*, *Solanum ligustrinum*, *Tanacetum pathenium*, y *Berberis actinacantha*.

A partir del análisis de las rodelas basales, fue posible estimar el estado sanitario actual de los vástagos. En general, los individuos de este bosque, presentan un buen estado sanitario, pues sólo el 5% de las rodelas presentaron algún grado de pudrición central (mancha café) y el 11% de ellas presentaron daño probablemente de origen mecánico (caída de árboles vecinos, nieve).

4.1.1 Estructura del rodal

El bosque posee una estructura de monte bajo irregular. Los árboles presentan una alta regeneración a partir de una cepa, pudiendo encontrarse hasta 11 vástagos por cepa, situación bastante similar en las tres zonas donde se desarrolló el estudio.

La reproducción vegetativa a partir de rebrotes de cepa, es común para algunas especies del género *Nothofagus*. La estructura de monte bajo ha sido reportada en *Nothofagus alesandrii*, *Nothofagus glauca* y *Nothofagus alpina*. (Vita, 1974; Mollenhauer, 1975; De la Maza, 1976; Cubillos, 1988; Gómez, 2005).

A partir del inventario realizado en el área de estudio, se determinó un área basal media de 43,66 m²/ha y una densidad media de 6.527 vástagos/ha, que se distribuyen en 1.610 cepas/ha (Cuadro 2).

Cuadro 2: Antecedentes dasométricos del área de estudio

Zona	Antecedentes Dasométricos Medios		
	Área Basal (m ² /Ha)	Vástagos (Nº/Ha)	Cepas (Nº/Ha)
1	62,4	9.131	1.671
2	39,9	6.096	1.845
3	28,7	4.355	1.312
Promedio	43,7	6.527	1.610

4.1.2 Estructura del renoval

El renoval posee vástagos de pequeño tamaño. La altura promedio del renoval en estudio es de 7,8 m, encontrándose vástagos con alturas desde 2,5 m hasta 12,7 m. Los diámetros a la altura del pecho en esta zona varían de 1,3 cm a 17,9 cm, con un promedio de 7,4 cm (Cuadro 3).

Cuadro 3: Distribución de DAP y alturas por clases diamétricas

Clase diamétrica (cm)	Tamaño muestral	DAP (cm)			Tamaño muestral	Altura (m)		
		Promedio	Mínimo	Máximo		Promedio	Mínimo	Máximo
1 - 3	15	2,3	1,3	2,9	5	2,8	2,5	3,7
3 - 6	77	4,6	3,0	5,9	15	6,3	5,0	7,5
6 - 9	80	7,4	6,0	8,9	18	8,1	6,4	10,6
9 - 12	41	10,2	9,0	11,7	12	8,6	7,0	10,6
12 - 15	20	13,1	12,0	15,0	10	9,3	8,1	11,4
15 y más	7	16,3	15,1	17,9	3	11,5	10,2	12,7
Total	240	7,4			63	7,7		

El renoval posee una edad promedio de 39 años, con valores mínimos y máximos de 10 y 64 años, respectivamente. La estructura de edad de este renoval es irregular, no existe una única edad ni clase de edad entre todos los vástagos analizados. Las edades entre todos los individuos analizados, se presentan de manera heterogénea (Cuadro 4).

Cuadro 4: Distribución de edades por clases diamétricas

Clase diamétrica (cm)	Tamaño muestral	Edad (años)		
		Promedio	Mínimo	Máximo
1 - 3	15	23	12	53
3 - 6	77	33	14	62
6 - 9	80	40	10	59
9 - 12	41	47	34	63
12 - 15	20	49	26	64
15 y más	7	52	46	60
Total	240	39		

Esta estructura no sólo se presenta a nivel del renewal, sino también a nivel de cepa, donde las edades de los vástagos de una misma cepa no son homogéneas. En una de las zonas del área de estudio, se identificaron las cepas de cada uno de los vástagos cortados, y a partir de las edades encontradas en las rodela basales, se determinó que la estructura de edad a nivel de cepas, también es irregular (Apéndice 1).

Donoso (2007), realizó una caracterización espacial, de la estructura y de la condición actual de la formación boscosa del Santuario de la Naturaleza Cerro El Roble. Determinó que cerca del 80% de la población de roble de Santiago, se encuentra concentrada en la clase diamétrica de 5 a 10 cm, sugiriendo una coetaneidad entre los vástagos, antecedente que sería posible descartar, de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio.

La estructura de edad irregular del renewal de *N. macrocarpa*, en el área de estudio, no coincide con los antecedentes de otras especies del género *Nothofagus*. Mollenhauer (1975), señala que los bosques de *N. glauca* ubicados en Bullileo (VII Región), presentan estructuras de monte bajo coetáneos, sobretudo en aquellas áreas que fueron más intensamente explotadas. Gómez (2005), indica que los bosquetes de *N. alessandrii*, en la Comuna de Empedrado (VII Región), probablemente sean de edad homogénea, puesto que observó regeneración masiva y uniforme de los tocones y rebrotes, productos de incendios, explotaciones forestales y otras alteraciones de gran escala. En el caso de los renewales de *N. alpina*, se ha indicado que como consecuencia de la acción antrópica y de fenómenos naturales (incendios, deslizamientos de terreno, etc), la mayoría de los bosques de segundo crecimiento tienen una estructura de monte bajo coetáneo (Vita, 1974; Herrera y May, 1976; De la Maza, 1976; Álvarez y Rojas, 1980).

4.2 Crecimiento de los vástagos del renoval

4.2.1 Incremento en altura

A través del análisis de tallo se determinó que los vástagos presentan un incremento medio anual en altura (IMAA), cercano a 30 cm/año. A partir de las cicatrices de las yemas apicales, se obtuvo el crecimiento medio de los últimos 2 años, este es de alrededor de 4 cm/año (Cuadro 5).

Cuadro 5: Incremento medio anual en altura (IMAA) y crecimiento de los últimos 2 años por clases diamétricas para el área de estudio

Clase diamétrica (cm)	IMAA (cm/año)	IMAA (cm) últimos 2 años
1 - 3	21,8	4,1
3 - 6	41,7	3,1
6 - 9	33,4	3,7
9 - 12	27,9	4,2
12 - 15	23,7	6,0
15 y más	38,0	4,9
Promedio	32,3	4,1

Por otro lado, se estableció que existe una buena relación entre la edad de los vástagos y su altura (Figura 3). Inicialmente y hasta alrededor de los 40 años, el crecimiento en altura es mayor. Posteriormente, a esta edad, se produce una marcada reducción del crecimiento en altura. Esto se debería a la alta competencia que hay entre los vástagos, sobretodo entre aquellos de mayores diámetros y alturas.

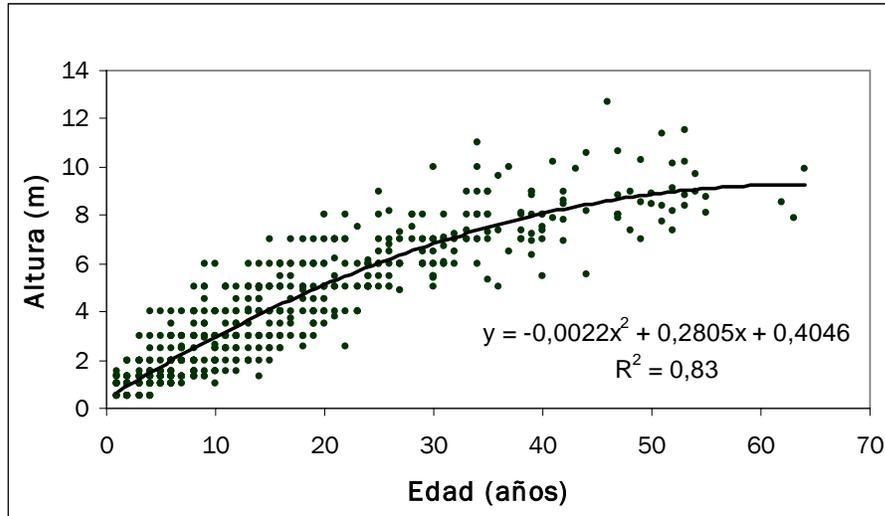


Figura 3: Relación altura-edad de los vástagos

Los valores de IMAA obtenidos en este estudio (32,3 cm/año), se encuentran por debajo de las tasas observadas en roble y raulí, en el sur del país. De la Maza (1976), en renovales de raulí (monte bajo), localizados en la Provincia de Bío Bío, obtuvo incrementos medio anuales en altura entre 58 y 67 cm/año. En la Cordillera de Nahuelbuta, Álvarez y Rojas (1980), determinaron la estructura, crecimiento y rendimiento de renovales de raulí, con estructura de monte medio. Ellos obtuvieron incrementos de 35 cm/año para el renoval de 36 años, y 37 cm/año para el renoval de 38 años. Cubillos (1988), realizó un estudio en la Comuna de Valdivia (X Región), donde estimó el incremento medio anual en altura, para renovales mixtos de Raulí de 30 años, este fue de 44 cm/año, con un coeficiente de variación de 31%. Donoso (1988), a través de una caracterización de los renovales de roble y raulí en el Área de Protección Radal Siete Tazas, obtuvo un incremento medio anual en altura de 40 cm/año, para un renoval puro de roble de 37 años. El mismo autor en otro sector del área de protección, obtuvo un incremento medio anual de 51 cm/año para raulí y 58 cm/año para roble, ambos de 47 años.

Las variaciones en el IMAA para el roble y el raulí, pueden estar dadas no sólo por las características particulares de los bosques donde se desarrollaron estas investigaciones (estructura y composición), sino también por las diferentes condiciones ambientales donde dichas especies se desarrollan. Sin embargo, a pesar de existir diferencias entre

los estudios, las tasas de crecimiento de roble y raulí, son superiores a las obtenidas para roble de Santiago.

Algunos antecedentes permiten afirmar que el hualo (*N. glauca*), presenta IMAA similares e incluso inferiores a los del roble de Santiago. Barrales (1993), realizó una caracterización de renovales de esta especie, en la precordillera andina de Talca, obteniendo un crecimiento medio anual en altura de 28 cm/año, entre los 3 y 30 años. Jara (2006), evaluó el crecimiento de renovales de hualo en esta misma zona, efectuando un tercer control de parcelas permanentes de raleo. Concluyó que el crecimiento en altura era independiente de los diferentes tratamientos de raleo, y que las variaciones serían atribuibles al sitio. Obtuvo un crecimiento medio, de los árboles más gruesos (H_{100}^1), de entre 19 y 34 cm/año.

4.2.2 Incremento en diámetro

El incremento medio anual en diámetro (IMAD), para el área de estudio, es de 0,23 cm (Cuadro 6). Al observar el comportamiento en las diferentes clases diamétricas se puede ver que este incremento es mayor para las clases diamétricas superiores.

Adicionalmente, se analizó el incremento periódico anual en diámetro (IPAD), para los últimos 5 años, no encontrándose grandes variaciones entre las diferentes clases diamétricas (Cuadro 6).

Cuadro 6: Incremento medio anual en diámetro (IMAD) e incremento periódico anual (IPAD), por clases diamétricas para el área de estudio

Clase diamétrica (cm)	IMAD (cm/año)	IPAD (cm) últimos 5 años
1 - 3	0,21	0,20
3 - 6	0,18	0,16
6 - 9	0,23	0,18
9 - 12	0,25	0,17
12 - 15	0,29	0,20
15 y más	0,37	0,20
Promedio	0,23	0,18

¹ H_{100} : altura promedio de los 100 árboles mas gruesos del rodal

Al igual que el IMAA, el IMAD obtenido para el roble de Santiago es inferior a los valores encontrados en especies del mismo género en nuestro país. Los crecimientos diametrales anuales en renovales de roble y raulí de segundo crecimiento, varían de acuerdo al sitio y la edad de los árboles. Los valores van desde 0,3 a 0,8 cm/año, habiéndose encontrado incluso valores de hasta 1 cm/año (Vita, 1974; De la Maza, 1976; Herrera y May, 1976; Soler, 1979; Wadsworth, 1976; Álvarez y Rojas, 1980; FORVESA, 1987; Donoso, 1988; Grosse, 1989; Donoso *et al*, 1993a; Echeverría y Lara, 2004).

Los estudios realizados en hualo, muestran que esta especie presenta crecimiento diametral muy similar al de roble de Santiago. Barrales (1993), obtuvo incrementos medio anuales que van desde 0,07 cm/año hasta 0,41 cm/año, con un promedio de 0,23 cm/año. Jara (2006), evaluó la aplicación de raleos en renovales de hualo, encontrando en el tratamiento sin intervención (T_0) una tasa de crecimiento de 0,24 cm/año. El incremento medio anual en diámetro, de los árboles de área basal media, fue de 0,13 cm/año, valor que es inferior al encontrado en esta investigación para el roble de Santiago.

Los valores de incremento medio anual en altura y en diámetro, encontrados en el área estudiada de la formación boscosa del Cerro El Roble, son los primeros antecedentes respecto al comportamiento de estas variables, en los bosques de *N. macrocarpa*. Es importante mencionar que actualmente no existen estudios de crecimiento de esta especie, por lo cual se hizo una comparación con especies como roble, raulí y hualo. Sin embargo, el crecimiento de estas especies, en particular de roble y raulí, no refleja un comportamiento similar y comparativo con roble de Santiago, puestos que se desarrollan en condiciones ambientales diferentes a la encontrada en el Cerro El Roble.

Las bajas tasas de crecimiento de *N. macrocarpa* son el reflejo de las condiciones de sitio, que se presentan en el área de estudio: clima con influencia mediterránea, con estaciones marcadas, veranos con altas temperaturas e inviernos con muy bajas temperaturas, incluso en forma de nieve. Estas características climáticas, y las altas densidades en que se encuentran estos bosques de segundo crecimiento, podrían condicionar una alta competencia por luz y agua, entre los individuos.

En la zona de estudio, se ha observado que la aplicación de clareo en las cepas, produce mayor disponibilidad de agua, siendo más notorio en aquellos sectores donde se extrajo

la mayor área basal (60%). En estas áreas los individuos presentaron mayores crecimientos en DAP y DAC (diámetro a la altura del cuello) (Peña-Rojas y Riquelme, 2008). Por lo cual, es posible afirmar que la aplicación de tratamientos silviculturales, que permitan aumentar la disponibilidad de luz y agua, podrían llevar a un aumento de las tasas de crecimiento en diámetro y altura.

4.3 Volumen

4.3.1 Función de volumen

En el cuadro 7 se muestran los resultados del ajuste de los modelos aplicados a los datos, donde es posible observar los coeficientes de determinación y errores estándar de estimación correspondientes a cada modelo. Estos parámetros, en conjunto con la distribución de residuos, fueron utilizados para seleccionar la función local de volumen para *N. macrocarpa*, desarrollada en el área de estudio.

Cuadro 7: Funciones de volumen ajustadas para *N. macrocarpa*, y parámetros de selección

Modelo	Función Estimadora (v en m ³ , DAP en cm y G _i en cm ²)	R ² (%) [*]	E (%) ^{**}	
1	$v = b_0 * DAP^{b_1}$	$v = 0,000121272 * DAP^{2,47109}$	96,87	16,49
2	$v = b_0 + b_1 * DAP^2$	$v = -0,00738375 + 0,000456155 * DAP^2$	93,74	0,79
3	$v = b_0 + b_1 * DAP + b_2 * DAP^2$	$v = 0,018181 - 0,00560818 * DAP + 0,000727047 * DAP^2$	94,85	0,71
4	$v = b_0 + b_1 * G_i^2$	$v = 0,013926 + 0,00000255301 * G_i^2$	93,24	0,83

* R², Coeficiente de Determinación; ** E, Error Estándar de Estimación

De los modelos evaluados (Cuadro 7), el que presentó mayor coeficiente de determinación y menor error estándar, fue el modelo 3, de tipo polinómico. Pero, al observar la distribución de residuos estandarizados de éste, se observó que presentaban una distribución más bien dispersa en la gráfica, con respecto a la recta (Figura 4).

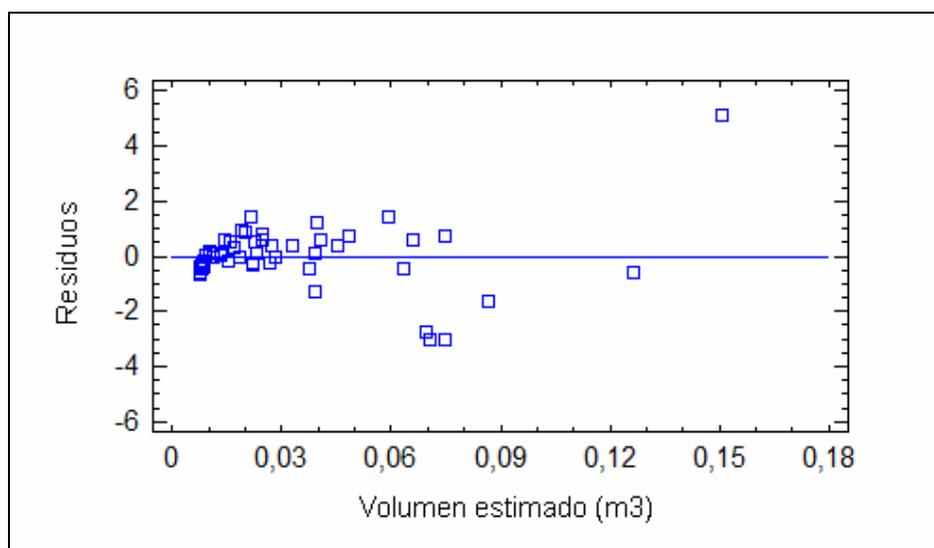


Figura 4: Distribución de residuos para el modelo 3

A partir de la inadecuada distribución de residuos del modelo 3, se procedió a evaluar los otros modelos que presentaban altos coeficientes de determinación y bajos errores estándar de estimación. Considerando estos parámetros, el modelo 1 fue descartado inmediatamente, pues presentó un elevado error de estimación. Por ello, se evaluó la distribución de residuos de los modelos 2 y 4.

Puesto que la nube de puntos de los residuos, de estos modelos (2 y 4), no estaba homogéneamente distribuida (Apéndice 3), se decidió utilizar un método adicional para determinar el que representaba el mejor ajuste. Para esto se realizó la Prueba de Park, que permite verificar la homogeneidad de varianzas de los residuos. Este análisis no fue concluyente respecto a la selección entre los modelos en cuestión, puesto que ambos presentaban varianzas homogéneas.

Finalmente la discriminación entre el modelo 2 y 4, se realizó en base a la aplicabilidad práctica del modelo, la posibilidad de medición de las variables independientes y la simplicidad del modelo². Es por ello que se optó por validar el modelo 2, el cual tiene como variable independiente el DAP.

² Comunicación personal. Profesor Sergio Mora. Dpto Manejo de Recursos Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 2008.

Para la validación del modelo 2, de tipo lineal, se utilizó la submuestra, con lo cual se obtuvo un error cuadrático medio (ECM) de 24,6% (Cuadro 8).

Cuadro 8: Validación del modelo 2, utilizando la submuestra

VALIDACIÓN MODELO 2 ($v = - 0,00738375 + 0,000456155 * DAP^2$)			
Dap	Vol. Smalian (m³)	Vol. estimado (m³)	(Dif (observado - ajustado))²
12,55	0,0479	0,0645	0,00027
10,15	0,0320	0,0396	0,00006
14,95	0,1209	0,0946	0,00070
8,75	0,0252	0,0275	0,00001
16,74	0,1321	0,1204	0,00014
4,71	0,0054	0,0027	0,00001
6,22	0,0071	0,0103	0,00001
		ECM : 24, 6%	

4.3.2 Productividad en volumen

La productividad en volumen se obtuvo a partir del volumen obtenido mediante la fórmula de Smalian, para cada uno de los vástagos cosechados. Esta productividad fue calculada dividiendo el volumen de cada vástago por la edad obtenida en la rodela basal correspondiente. A partir de esto, se pudo obtener la productividad media en m³/año/individuo.

Los vástagos presentan una productividad media anual de 0,0008 m³ y el volumen a nivel individual es en promedio 0,0392 m³ (Cuadro 9).

Cuadro 9: Productividad a nivel de individuos

Clase diámetrica (cm)	Productividad (m³/año/indiv)	Volumen (m³)
3 - 6	0,00021	0,0067
6 - 9	0,00054	0,0215
9 - 12	0,00075	0,0375
12 - 15	0,00129	0,0683
15 - 18	0,00282	0,1422
Promedio	0,00075	0,0358

La Figura 5 muestra la alta relación entre el DAP y la productividad media anual de los vástagos. El gráfico muestra la tendencia creciente que tiene la productividad, a medida que aumenta el DAP.

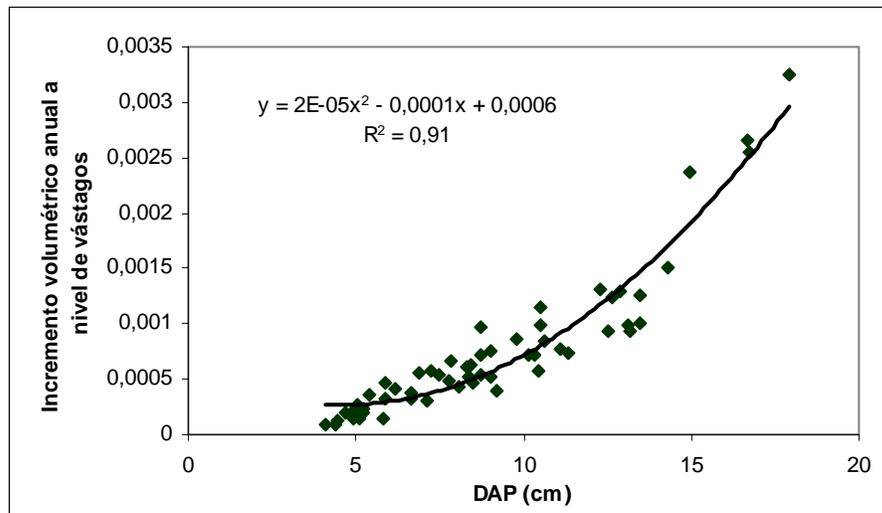


Figura 5: Relación DAP (cm) - productividad media anual en volumen a nivel de individuos ($\text{m}^3/\text{año}/\text{individuo}$)

Se obtuvo adicionalmente la productividad media anual para el área de estudio. Este valor fue calculado utilizando la función de volumen local generada y el incremento periódico anual en diámetro (IPAD), de los últimos 5 años. La productividad media es de $0,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, valor evidentemente muy inferior a los encontrados en especies como roble, raulí e incluso hualo. Renovales de raulí ubicados en Jauja (IX Región), presentaron valores de hasta $18 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ (FORVESA, 1987). Donoso (1988), en un estudio realizado en Radal Siete Tazas, obtuvo productividades de $4 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en sitios malos, y $18 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en aquellos sitios que no presentaban limitaciones al crecimiento de renovales con alta presencia de roble o raulí. Por otro lado, en renovales de hualo ubicados en la VII Región, Barrales (1993), obtuvo un incremento medio anual de $4,4 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$.

Como se mencionó anteriormente las condiciones de sitio y la estructura actual, de los bosques de *N. macrocarpa* estudiados, estarían condicionando la baja productividad a nivel de vástagos y a nivel de sitio.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis global de los resultados obtenidos, es posible concluir que *N. macrocarpa*, luego de la corta o pérdida del fuste, presenta una producción de brotes durante varios años, lo cual se refleja por la variabilidad de edad de los vástagos por cepa.

Las tasas de crecimiento en diámetro, altura y volumen, son muy inferiores a las reportadas en especies como roble y raulí. Sin embargo, se debe tener en consideración que las condiciones de sitio donde estas especies se desarrollan son distintas a las encontradas en el Cerro El Roble.

El roble de Santiago, es una especie que presenta algunas características comunes al hualo. Posee tasas de crecimiento en diámetro y altura muy similares, pero la productividad media en volumen de *N. macrocarpa*, es inferior a la del hualo.

La alta variabilidad de edad, en conjunto con las bajas tasas de crecimiento en diámetro y altura, hacen suponer que al interior de cada cepa, y entre cepas, existe un nivel de competencia tal, que no permite un mejor desarrollo de los individuos. Sin embargo, esta competencia sería el resultado de las condiciones ambientales imperantes en la zona. El déficit hídrico y la alta cobertura de copas existente en la zona, son factores que están afectando el crecimiento de la especie. Una mayor disponibilidad hídrica permitiría aumentar las tasas de crecimiento de los vástagos, para lo cual se hace necesaria la aplicación de intervenciones silviculturales que lleven a una menor densidad y por ende mayor disponibilidad de luz y agua.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, F. y ROJAS, A. 1980. Estructura, crecimiento y rendimiento de un renoval de raulí (*Nothofagus alpina*), en la Cordillera de Nahuelbuta. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 76 p.
- BARRALES, L. 1993. Caracterización de renovales de hualo (*Nothofagus glauca*) en la Precordillera Andina de Talca. Informe de Práctica Profesional. Talca. Universidad Católica del Maule. 69 p.
- BENOIT, I. 1989. Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile. Primera parte. CONAF. 157 p.
- CASTILLO, F. 1992. Caracterización, estudio dendrológico y proposición de intervenciones silvícolas para renovales de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) Oers). Cordillera de la Costa. IX Región. Memoria Ingeniería Forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile. 68 p.
- CONAMA. 2004. Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago. Gobierno de Chile. 104 p.
- CUBILLOS, V. 1988. Funciones de volumen y factor de forma para renovales de Raulí. Ciencia e Investigación Forestal 1: 68-76.
- CHILE. 2000. Ministerio de Educación. Decreto Exento N° 229. Junio de 2000.
- DE LA MAZA, C. 1976. Determinación del área basal ideal para renovales de raulí (*Nothofagus alpina*) en la Provincia de Bio Bío. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 46 p.
- DONOSO, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina: Variación, estructura y dinámica. Primera edición. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. 484 p.

- DONOSO, L. 2007. Propuesta de intervención silvícola con fines de conservación para la formación boscosa de *Nothofagus macrocarpa* (Caleu, Prov. Chacabuco). Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 112 p.
- DONOSO, P. 1988. Caracterización y proposiciones silviculturales para renovales de Roble (*Nothofagus obliqua*) y Raulí (*Nothofagus alpina*) en el área de protección "Radal 7 Tazas", VII Región. Bosque 9(2): 103-114.
- DONOSO, P., MONFIL, T., OTERO, L. y BARRALES, L. 1993a. Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de la provincia de Cautín y Valdivia. Ciencia e Investigación Forestal 7(2): 253-287.
- DONOSO, P., DONOSO, C. y SANDOVAL, V. 1993b. Proposición de zonas de crecimiento de renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución natural. Bosque 14(2): 37-55.
- ECHEVERRÍA, C. y LARA, A. 2004. Growth patterns of secondary *Nothofagus obliqua*-*Nothofagus alpina* forests in Southern Chile. Forest Ecology and Management 195 (2004): 29-43.
- ESPINOSA, V. 2002. Guía de Manejo Santuario de la Naturaleza Cerro El Roble. CONAF. Región Metropolitana. 53 p.
- FLÁNDEZ, A. 1998. Evaluación de la exactitud de funciones de volumen de *Nothofagus glauca* y *Nothofagus obliqua* en la provincias de Talca y Linares. Memoria Licenciado en Ciencias Forestales. Talca. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. 47 p.
- FORESTAL RÍO VERGARA S.A. (FORVESA). 1987. Raulí. Manejo de renovales. Chile. 12 p.

- GAJARDO, R. 1994. La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica. Santiago. Editorial Universitaria. 165 p.
- GAJARDO, R. 2001. Antecedentes sobre el “Roble de Santiago” o “Roble blanco” (*Nothofagus macrocarpa*) y sus problemas de conservación. Bosque Nativo 28: 3-7.
- GÓMEZ, P. 2005. Estructura y dinámica de los fragmentos de bosques de Ruil, *Nothofagus alesandrii*, en la comuna de Empedrado, VII Región del Maule. Memoria Ingeniería Forestal. Talca. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. 105 p.
- GROSSE, H. 1989. Renovales de Raulí, Roble, Coihue y Tepa, expectativas de crecimiento. Ciencia e Investigación Forestal 3(6): 37-72.
- GUTIÉRREZ, N. 2004. Evaluación del crecimiento y rendimiento volumétrico en ensayos de plantación de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina* al aplicar intervenciones silvícolas. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 46 p.
- HERRERA, J. y MAY F. 1976. Caracterización y análisis para el ordenamiento de renovales de raulí en la precordillera andina de la Provincia de Valdivia. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile. 63 p.
- JARA, C. 2006. Crecimiento de renovales de hualo sometidos a distintos tratamientos de raleo. Informe presentado como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero en Ejecución Forestal. Universidad Católica del Maule. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 41 p.
- LUEBERT, F. y PLISCOFF, P. 2006. Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile. Editorial Universitaria S.A. Santiago. Chile. 316 p.
- MARTICORENA, C. y RODRÍGUEZ, R. 2003. Flora de Chile. Vol 2, Nº 2. Universidad de Concepción. Concepción. 91 p.

- MOLLENHAUER, K. 1975. Estudio de estructura en renovales de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser en Bullileo. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 63 p.
- MONGOMERY, D. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Ed. Iberoamericana. México. 589 p.
- MUÑOZ, M., NÚÑEZ, H. y YÁNEZ, J. 1996. Libro Rojo de los Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica en Chile. CONAF. 203 p.
- ORMAZÁBAL, C y BENOIT, I. 1987. El estado de conservación del género *Nothofagus* en Chile. Bosque 8(2): 109-120.
- OSTLE, B. 1968. Estadística Aplicada. Técnica de la Estadística Moderna, cuando y donde aplicarlas. México. Editorial Limusa - Wiley, S.A. 629 p.
- PASTUR, G., CELLINE, J., LENCINAS, M., VUKASOVIC, R., PERI, O. y DONOSO, S. 2002. Response of *Nothofagus betuloides* (Mirb) Oersted to different thinning intensities in Tierra del Fuego, Argentina. Interciencia 27(12): 679-685.
- PEÑA-ROJAS, K y RIQUELME, A. 2008. Informe anual año 2007, Proyecto FONDECYT N° 1061100: Efecto de las intervenciones silvícolas sobre: el desarrollo, relaciones hídricas y eficiencia en la conversión de energía radiante en vástagos de *Nothofagus macrocarpa*, ubicados en la zona de Cerro El Roble, Provincia de Chacabuco.
- PÉREZ, A. y ROJAS, H. 1991. Estimación de biomasa y nutrientes en un renoval de Hualo. Informe final Taller de Habilitación Profesional. Escuela Tecnológica Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Sede del Maule. Talca. 42 p.
- PRODAN, M., PETERS, R., COX, F., REAL, P. 1997. Mensura Forestal. IICA. San José. Costa Rica. 561 p.

- SANTIBÁÑEZ, F. y URIBE, J. M. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 65 p.
- SOLER, M. 1979. Análisis evolutivo y comportamiento de renovales no intervenidos de raulí (*Nothofagus alpina*) según edad. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 59 p.
- VÁSQUEZ, F. y RODRÍGUEZ, R. 1999. A new subspecies and two new combination of *Nothofagus* Blume (Nothofagaceae) from Chile. Botanical Journal of Linnean Society (London) 129: 75-83.
- VITA, A. 1974. Algunos antecedentes para la silvicultura del raulí (*Nothofagus alpina*). Boletín técnico N°28. Escuela de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 15 p.
- WADSWORTH, R. 1976. Aspectos ecológicos y crecimiento del raulí (*Nothofagus alpina*) y sus asociados en bosques de segundo crecimiento de las Provincias de Bio Bío, Malleco y Cautín, Chile. Boletín Técnico N°37. Escuela de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 41 p.

APENDICES

Apéndice 1: Edad de los vástagos identificados en la zona 3

Nº Cepa	Nº Vástago	Edad (años)	DAP (cm)
1	1	36	5,1
1	2	26	6,7
1	3	46	10,7
1	4	47	13,2
1	5	32	4,5
1	6	36	6
1	7	53	6,6
1	8	41	8,3
1	9	35	4,5
1	10	39	6,3
1	11	41	5
3	1	37	8,3
3	2	63	9,2
3	3	35	5,8
3	4	43	8,1
3	5	49	6
3	6	42	10,4
4	1	34	6,9
4	2	36	6,1
4	3	45	9,4
4	4	32	7,1
5	1	40	8,8
5	2	29	7,3
5	3	50	5,3

Nº Cepa	Nº Vástago	Edad (años)	DAP (cm)
6	1	38	8,4
6	2	23	2
6	3	28	4,7
6	4	35	5
7	1	50	10,7
7	2	51	10,6
7	3	35	4,9
8	1	31	3
8	2	30	6,5
9	1	47	10,2
9	2	27	5,4
10	1	46	8,4
10	2	45	10
11	1	55	9,5
12	1	52	11,7
13	1	38	8,8
13	2	40	6,7
14	1	59	8,9
15	1	47	9
16	1	50	7,2
17	1	46	12

Apéndice 2: Resultados Análisis de Regresión Funciones de Volumen

Modelo 1

Análisis de Regresión - Modelo Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$

Variable dependiente: Vol

Variable independiente: Dap2

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
Ordenada	-9,01747	0,136197	-66,2089	0,0000
Pendiente	1,23555	0,0317023	38,9734	0,0000

NOTA: ordenada = $\ln(a)$

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Val
Modelo	41,3134	1	41,3134	1518,93	0,00
Residuo	1,30556	48	0,0271991		
Total (Corr.)	42,619	49			

Coefficiente de Correlación = 0,984564

R-cuadrado = 96,9367 porcentaje

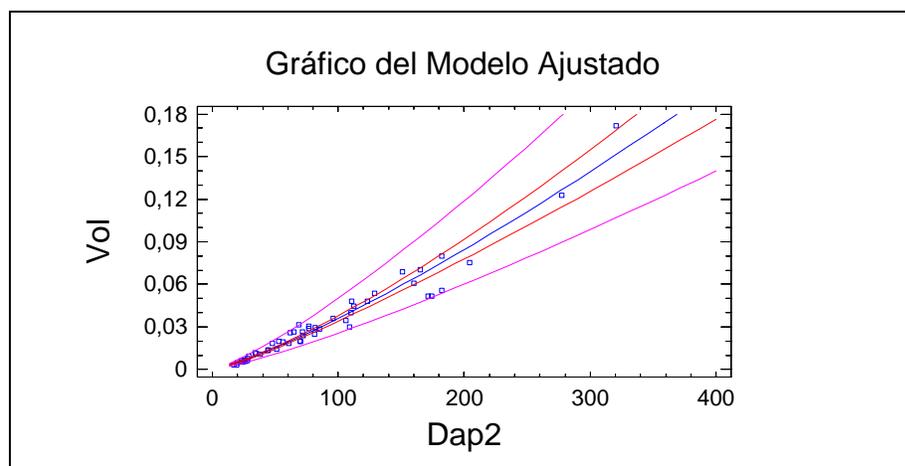
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,8729 porcentaje

Error estándar de est. = 0,164922

Error absoluto medio = 0,13038

Estadístico de Durbin-Watson = 1,88347 (P=0,3366)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0459953



Modelo 2:

Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b \cdot X$

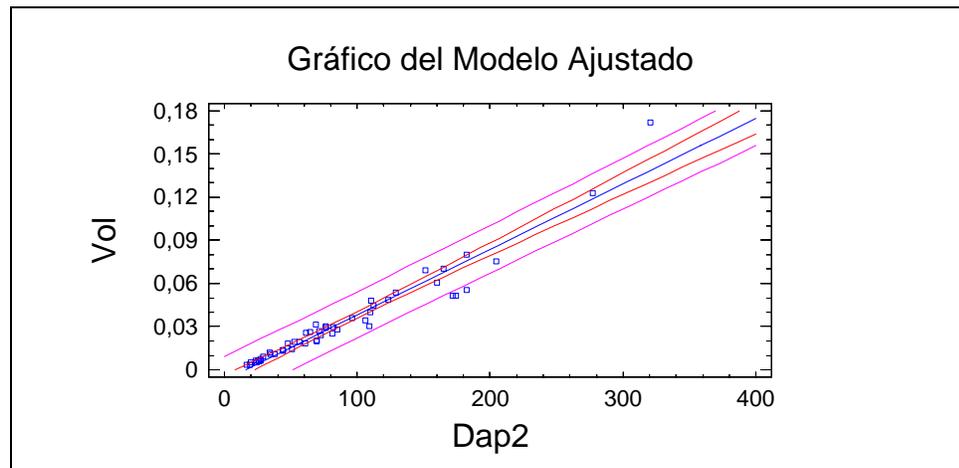
Variable dependiente: Vol
Variable independiente: Dap2

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
Ordenada	-0,00738375	0,00189016	-3,90641	0,0003
Pendiente	0,000456155	0,0000170091	26,8183	0,0000

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Val
Modelo	0,0454336	1	0,0454336	719,22	0,00
Residuo	0,00303218	48	0,0000631704		
Total (Corr.)	0,0484658	49			

Coefficiente de Correlación = 0,968213
R-cuadrado = 93,7437 porcentaje
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93,6133 porcentaje
Error estándar de est. = 0,00794798
Error absoluto medio = 0,00480894
Estadístico de Durbin-Watson = 1,58726 (P=0,0674)
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0256219



Modelo 3:

Análisis de Regresión Polinomial

Variable dependiente: Vol

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-Val
CONSTANTE	0,018181	0,00741591	2,45162	0,01
Dap	-0,00560818	0,00158367	-3,54126	0,00
Dap^2	0,000727047	0,0000780056	9,32045	0,00

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrados Medios	F-Ratio	P-Val
Modelo	0,0460723	2	0,0230361	452,34	0,00
Residuo	0,00239354	47	0,0000509263		
Total (Corr.)	0,0484658	49			

R-cuadrado = 95,0614 porcentaje

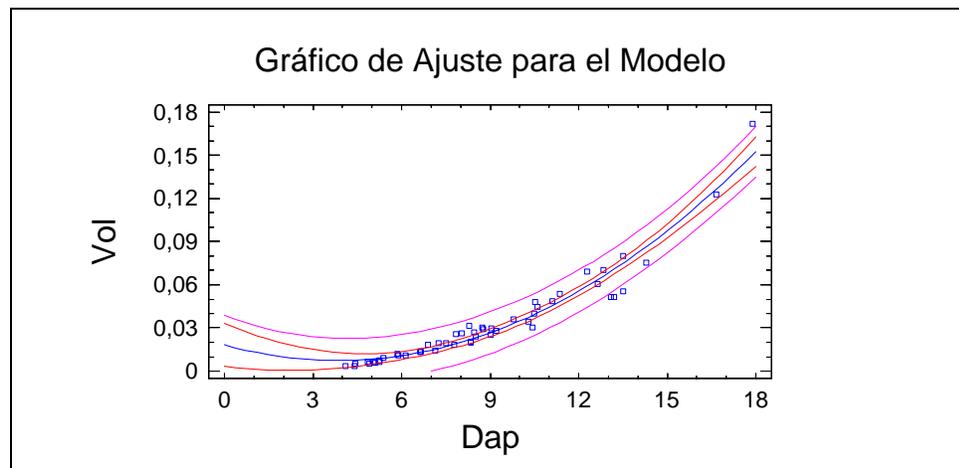
R-cuadrado (ajustado para d.f.) = 94,8512 porcentaje

Error Estándar de la Est. = 0,00713627

Error absoluto medio = 0,0047342

Estadístico Durbin-Watson = 1,79817 (P=0,2337)

autocorrelación de residuos en Lag 1 = 0,00839991



Modelo 4:

Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b \cdot X$

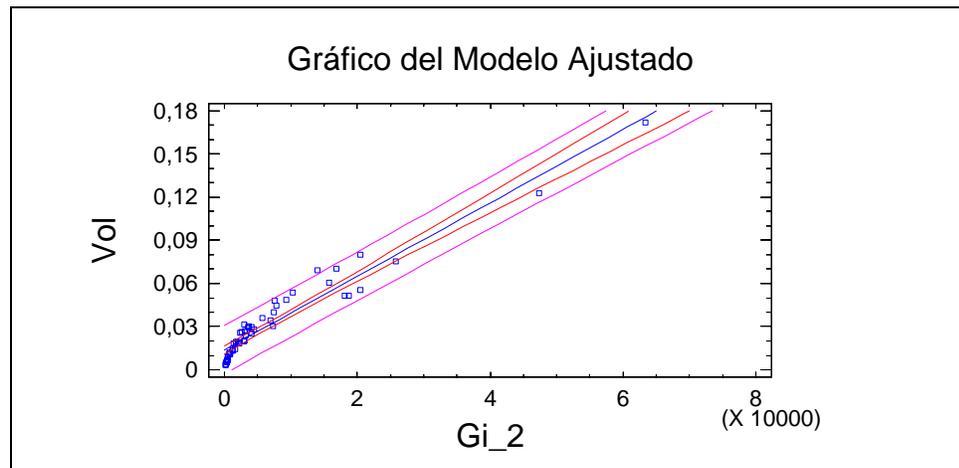
Variable dependiente: Vol
Variable independiente: Gi_2

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
Ordenada	0,0139226	0,00139059	10,012	0,0000
Pendiente	0,00000255301	9,91498E-8	25,749	0,0000

Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Val
Modelo	0,0451939	1	0,0451939	663,01	0,00
Residuo	0,00327189	48	0,0000681644		
Total (Corr.)	0,0484658	49			

Coefficiente de Correlación = 0,965656
R-cuadrado = 93,2491 porcentaje
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93,1084 porcentaje
Error estándar de est. = 0,00825617
Error absoluto medio = 0,00689251
Estadístico de Durbin-Watson = 1,92804 (P=0,3907)
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0302547



Apéndice 3: Gráficos de residuos modelo 2 y 4

