

Noviembre 2013



## Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (LENGA)

Unidad de Cambio Climático  
Gerencia Forestal  
Corporación Nacional Forestal

Jorge Gayoso  
Programa Bosques PROCARBONO  
Universidad Austral de Chile

Revisión Técnica:  
Angelo Sartori  
Jefe Unidad de Cambio Climático,  
Gerencia Forestal, CONAF

Fabián Milla  
Unidad de Cambio Climático,  
Gerencia Forestal, CONAF y  
Docente Universidad de Concepción,  
Campus Los Ángeles





Bosques de Lenga en Neltume Región de los Ríos. Foto gentileza CAMPO DIGITAL

## CONTENIDOS

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Prólogo</i> .....  | 5         |
| <b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2 ÁREA DE ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA</b> .....              | <b>10</b> |
| 2.1 Área de estudio .....   | 10        |
| 2.2 Descripción general de la especie <i>Nothofagus pumilio</i> ..... | 13        |
| 2.3 Selección de las unidades de estudio .....                        | 14        |
| <b>3 METODOLOGÍA</b> .....  | <b>16</b> |
| 3.1 Mediciones de terreno y obtención de muestras .....               | 16        |
| 3.2 Procesamiento de las muestras en laboratorio .....                | 17        |
| 3.3 Análisis estadístico .....  | 20        |
| <b>4 RESULTADOS</b> .....   | <b>21</b> |
| 4.1 Relaciones de forma de los árboles muestra .....                  | 21        |
| 4.2 Relaciones entre DAP y edad de los árboles .....                  | 22        |
| 4.3 Participación de los componentes .....                            | 23        |
| 4.4 Variaciones del contenido de humedad .....                        | 24        |
| 4.5 Variaciones de la densidad básica de la madera de Lengua .....    | 27        |
| 4.6 Contenido de carbono .....  | 30        |
| 4.7 Contenido de cenizas .....  | 31        |
| 4.8 Desarrollo de funciones alométricas para la especie Lengua .....  | 32        |
| 4.8.1 Biomasa aérea .....   | 32        |
| 4.8.2 Funciones por componente .....                                  | 35        |
| <b>5 COMENTARIOS FINALES</b> .....                                    | <b>37</b> |
| <b>6 REFERENCIAS</b> .....  | <b>38</b> |





Bosques de Lenga en Neltume Región de los Ríos. Foto gentileza CAMPO DIGITAL

## PRÓLOGO

El cambio climático es uno de los flagelos más relevantes que han debido abordar los países en las últimas décadas, jugando los ecosistemas forestales del mundo un rol preponderante en la discusión internacional asociada, donde por un lado se les atribuye un gran aporte en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producto de las altas tasas de deforestación y degradación que aún se reportan a escalas globales, y por otro, como parte de las medidas más eco-eficientes para que mediante la conservación, manejo sustentable y forestación en sitios adecuados, se incremente la remoción de GEI desde la atmósfera, almacenándolos en la biomasa aérea y subterránea de los árboles.

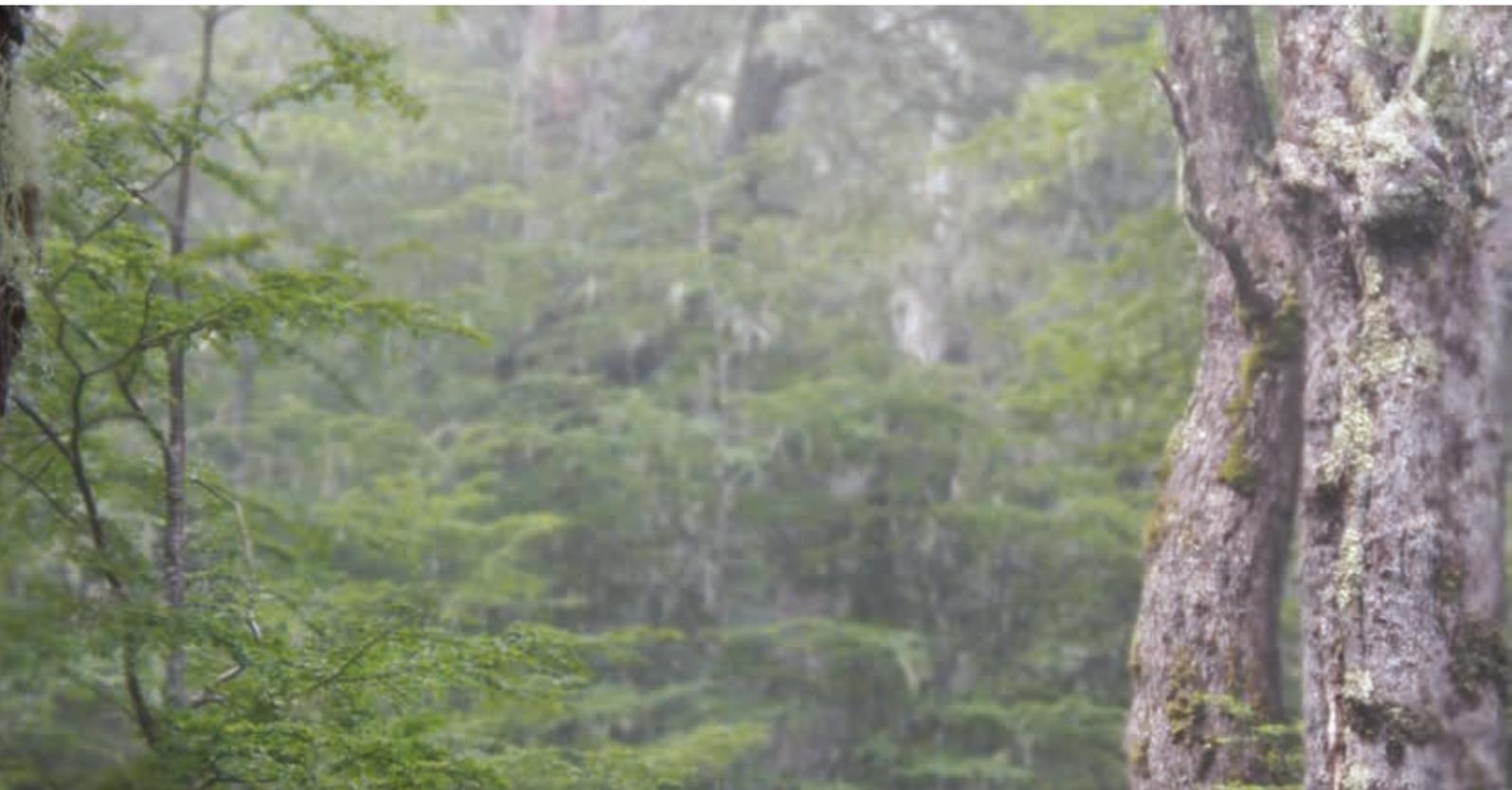
La Corporación Nacional Forestal (CONAF), a solicitud del Ministerio de Agricultura, ha formulado, la denominada Estrategia Nacional de Bosques y Cambio Climático (ENBCC), iniciativa con la que busca hacer frente a las exigencias de información y cumplimiento de reducción de GEI que ha comprometido Chile ante la comunidad internacional, centrándose en específico en disponer de fuentes de ingresos optativas que sean complementarias a lo que ya existe en el país, como es la generación de bonos de carbono forestal factibles de transar en mercados afines.

Es en este marco, que se ha trabajado intensamente con centros de investigación nacional para levantar información de primera línea que permita determinar las existencias de carbono presentes en los bosques nativos de Chile (tanto templados como esclerófilo) con la finalidad de contar con mejores insumos para el desarrollo del Inventario de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) a nivel país y, un robusto sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), agregando a ello, niveles de referencia válidos y verificados internacionalmente y, con disponibilidad libre para todos los usuarios.

En este marco es que se ha elaborado la presente publicación, que apunta a generar funciones alométricas para la determinación de existencias de biomasa de la especie *Nothofagus pumilio* (Lenga), dando pasos hacia una mejor estimación de las existencias de carbono forestal en los bosques nativos del país.

Con lo anterior, se busca ser un referente a nivel mundial, posicionando a Chile en materia de bosques y cambio climático, para lo cual se ha tenido una importante cooperación técnica y financiera de orden internacional, que se ha materializado en los últimos años con el Gobierno de Suiza, el Fondo Cooperativo del Carbono de los Bosques (FCPF por sus siglas en inglés) y el Fondo Global del Medio Ambiente (GEF por sus siglas en inglés), más una serie de otros aportes del sector privado de Chile de rubros como la minería, forestal, eléctrico y vitivinícola.

Paulatinamente, con estudios que aumentan la calidad de los reportes del INGEI e iniciativas como la ENBCC, Chile va escalando en credibilidad y empieza a tomar la delantera en cómo adaptarse y mitigar las causas y efectos del cambio climático, lo que implica que en el largo plazo el país cuente con más y mejores bosques y formaciones



Bosques de Lengua. Foto gentileza CAMPO DIGITAL



xerofíticas, que se valoren por los múltiples beneficios que ellos entregan al planeta, retribuyendo además a los dueños de estos ecosistemas en el entendido que son ellos quienes cuidan este patrimonio nacional.

Finalmente, cabe consignar que esfuerzos de estas características responden a una política de Estado que se centra en el concepto de desarrollo sustentable, donde se busca el aprovechamiento adecuado de estos recursos para satisfacer las actuales necesidades de la sociedad, pero no se comprometen los requerimientos de las futuras generaciones. En lo particular, la necesidad actual de la sociedad es utilizar la capacidad de los ecosistemas forestales de almacenar GEI, lo que da un impulso para avanzar en términos políticos, técnicos y de innovación para que el país cuente con un sector forestal integral y robusto, ocupándose al mismo tiempo de temas como la biodiversidad y la adecuada distribución de los beneficios a los dueños de bosques, como son los medianos y pequeños propietarios.

Eduardo Vial Ruiz-Tagle  
Director Ejecutivo  
Corporación Nacional Forestal

# 1. Introducción



Bosques de Lenga en Neltume Región de los Ríos. Foto gentileza CAMPO DIGITAL



## 1 INTRODUCCION

Este estudio fue encargado por la Unidad de Cambio Climático de la Gerencia Forestal de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) mediante la Resolución N°269 de fecha 06/09/2012 para la generación de funciones alométricas en la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus pumilio* (Lenga). Estudio inserto en el proyecto de Monitoreo Dendroenergía y Carbono Forestal que se desarrolla en el país para cuantificar los Gases de Efecto Invernadero presentes en los bosques nacionales, conforme a los compromisos de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y otras iniciativas locales.

Lo anterior, responde a la Estrategia Nacional de Bosques y Cambio Climático que lidera CONAF a través de la recientemente creada Plataforma de Generación y Comercio de Bonos de Carbono del Sector Forestal de Chile (PBCCCh), que contempla institucionalizar una serie de aspectos técnicos, entre los que está la determinación de niveles de referencia y el levantamiento de funciones alométricas para las especies nativas del país.

La participación del Programa Bosques PROCARBONO de la Universidad Austral de Chile consistió en el seguimiento de la toma de muestras, el desarrollo de un extenso programa de laboratorio y el análisis de los datos.

Motivan esta investigación tanto la importancia de la especie y tipo forestal, que es el segundo tipo forestal con mayor superficie cubriendo 26,3% del bosque nativo del territorio nacional, como la ausencia de funciones alométricas de biomasa que comprendan la distribución geográfica y todos los rangos de clases diamétricas para los bosques adultos y también adulto renoval.

Este estudio se basó en la cosecha de árboles para su pesaje integral y posterior toma de muestras, etapa que contó con todas las autorizaciones requeridas por la normativa vigente y realizada por la empresa CAMPO DIGITAL<sup>1</sup> mediante adjudicación de licitación pública por CONAF. Los árboles fueron donados por los propietarios expresamente para este estudio. La Universidad recibió las muestras de forma gradual entre los meses de febrero y abril de 2013. Muestras que se analizaron en laboratorio, entre los meses de marzo y julio de 2013.

Bosques PROCARBONO agradece a CONAF la oportunidad para realizar esta investigación y a los propietarios que donaron los árboles para este estudio.

<sup>1</sup> CAMPO DIGITAL, empresa de servicios múltiples, ha medido y pesado en campo más de 800 árboles y sus componentes para estudios de funciones alométricas de biomasa y carbono en los últimos 10 años.

# 2 ÁREA DE ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA

## 2.1 Área de estudio

El área de estudio desde donde se obtuvieron las muestras corresponden a casi toda la distribución de la especie *Nothofagus pumilio*, exceptuando la Región de Magallanes que cuenta con cierta información de estudios anteriores de otros autores para sitios de las Provincias de Última Esperanza y Timaukel. En el Cuadro 1 y Figura 1 se detalla la ubicación de los cinco predios. La descripción de los sitios sigue lo anotado por Campo Digital (2013).

### Predio Quepuca Ralco

El predio se ubica en el faldeo sur del Volcán Callaqui, distante aproximadamente 80 km al Sur Este de Mulchén. En este sector domina el tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, principalmente bajo los 1.000 m s.n.m., sobre esta altitud (límite altitudinal arbóreo) es posible encontrar los subtipos Coihue-Raulí-Tepa, Ciprés de la Cordillera, Araucaria y algunas comunidades aisladas de Lengua (Flora Chilena, 2013).

Los suelos corresponden a la serie Santa Bárbara (SBA), poco evolucionados, formados sobre cenizas volcánicas recientes, depositadas sobre substrato fluvioglacial o materiales fluviales. Son suelos profundos a muy profundos, bien drenados, de textura media, generalmente franco o franco limoso en el primer horizonte y franco limoso en profundidad, bien estructurados, buen arraigamiento y muy porosos. Los suelos propios de esta serie se presentan generalmente en topografías de lomajes y cerros. La permeabilidad es moderada y el escurrimiento superficial varía de moderadamente lenta a muy rápida según el tipo y longitud de la pendiente (Martínez, 2004).

Inmediatamente al sur del río Bio Bío, se comienzan a desarrollar los climas templados lluviosos, y en la zona andina, por sobre los 1.500 m s.n.m. se desarrolla el clima frío de altura, con precipitaciones anuales superiores a los 2.000 mm y bajas temperaturas que permiten la presencia de nieves permanentes. El predio Quepuca Ralco se encuentra justo en esta transición, debido a que se ubica en una altitud de 1.260 m s.n.m, en una zona vegetacional denominada higromórfica, por no tener una estación seca, o bien, reducida a uno o dos meses en el año (SIIT, 2013a).

## 2. Área de estudio y selección de la muestra

Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus pumilio* (Poepf. et Endl.) Krasser (LENGA)

**Cuadro 1 Ubicación geográfica de los sitios de estudio.**

| Ubicación                                     | Nombre del predio                            | Coordenadas geográficas | Altitud        |
|---|--|-------------------------|----------------|
| VIII Región, Comuna de Alto Bio Bío           | Quepuca Ralco, Hijuela 4 (particular)        | 37°59' S 71°27' O       | 1.260 m s.n.m. |
| XIV Región de Los Ríos, Comuna de Panguipulli | Neltume Carranco (Forestal Neltume Carranco) | 39°51' S 71°42' O       | 1.210 m s.n.m. |
| XI Región de Aysén, Comuna de Coyhaique       | R.N. Trapananda (CONAF)                      | 45°21' S 71°48' O       | 920 m s.n.m.   |
|   | El Sauco (Energía Austral)                   | 45°13' S 72° 0' O       | 750 m s.n.m.   |
|   | El Tordo (Forestal Mininco S.A.)             | 45°34' S 71°51' O       | 850 m s.n.m.   |

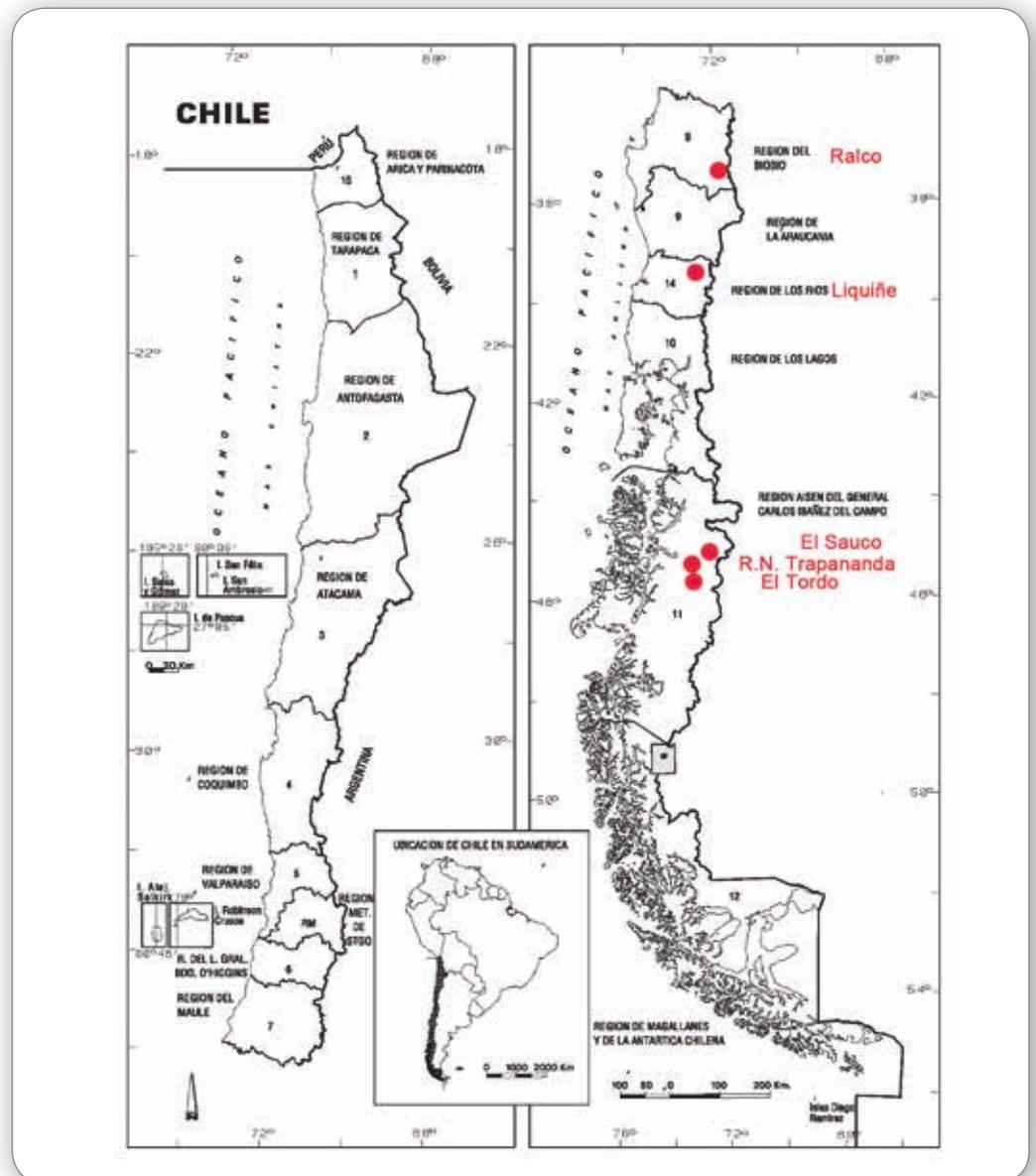


Figura 1. Ubicación de las áreas de muestreo

## 2. Área de estudio y selección de la muestra

### Predio Neltume - Carranco

El predio se ubica aproximadamente a 70 km al Sur Este de Panguipulli. En este sector dominan los tipos forestales Coihue-Raulí-Tepa, Lenga, Roble-Raulí-Coihue y Araucaria. A diferencia del predio Quepuca Ralco, en esta ubicación se observan comunidades puras de lenga sobre el límite altitudinal arbóreo.

No existe claridad con respecto a la serie de suelos de la zona estudiada, porque el sector cordillerano está fuera de clasificación, pero las series más cercanas son Liquiñe (LQE), Choshuenco (CSH) y Los Nevados (LON). Cabe destacar que el predio se encuentra en el área de influencia del Volcán Choshuenco, el cual es responsable de estas tres series de suelos; la serie CSH presenta escorias volcánicas, LQE pumicita y LON derivados de arenas volcánicas. Estas series presentan algunas similitudes en cuanto a su origen: materiales volcánicos sedimentados en el sector de la Cordillera de Los Andes. En general son suelos profundos, de textura superficial franco arenosa (CIREN, 2001).

El clima que presenta la Región de los Ríos es templado lluvioso, con un régimen de precipitaciones y ausencia de períodos secos distribuidas a lo largo de todo el año (SIIT, 2013b). El clima en el sector andino de Panguipulli se caracteriza por una alta precipitación anual (4.000 a 5.000 mm), las cuales en invierno comúnmente caen en forma de nieve, veranos cortos e inviernos húmedos. La temperatura anual promedio es de 11° C, la temperatura mínima promedio del mes más frío (agosto) es 5° C, la máxima promedio del mes más cálido (febrero) es 20° C (Álvarez y Lara, 2008).

### Predios ubicados en la XI Región

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, la zona de Coyhaique se encuentra bajo el clima trasandino con degeneración esteparia (IREN, 1979). Las precipitaciones varían entre 900 y 1.200 mm anuales en forma de lluvia y nieve (Mardones *et al.* 2007), disminuyendo gradualmente hacia el Este, a medida que se acerca la estepa. La temperatura media anual es de 8,7°C con fuerte oscilación térmica.

Se observa que la gran mayoría de cubierta vegetal de este sector corresponde al tipo forestal Lenga, además de comunidades aisladas de Coihue de Magallanes.

Según Schlatter (1996) la zona corresponde a una topografía de cordones montañosos subandinos. Los suelos de la zona se originan de la actividad volcánica y están compuestos principalmente de pumicitas y cenizas, cubiertos por sedimentos volcánicos de la época postglacial. En general son suelos poco evolucionados, jóvenes y profundos, ricos en materia orgánica.

## 2.2 Descripción general de la especie *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (Lenga)

*Nothofagus pumilio* es una especie endémica de los bosques templados de Sudamérica, monoica, caducifolia de hasta 30 m de altura y 1,5 m de diámetro. Su corteza es gris oscura con grietas longitudinales. Su madera es considerada de buena calidad, por lo cual es utilizada en la construcción, carpintería y fabricación de tejuelas (Flora Chilena, 2013). Es una especie semiheliófila, que se establece en gran número bajo una elevada cobertura, pero que requiere un aumento progresivo en la disponibilidad de luz para poder desarrollarse (López *et al.* 2003).

### Distribución geográfica de la especie

La distribución geográfica de esta especie es la más extensa en Chile, cubriendo más de 18 grados de latitud (2.200 km) por la cordillera de los Andes (Donoso, 2006). La superficie estimada del tipo forestal lenga en Chile es de 3,58 millones de ha (CONAF, 2011), cubriendo 26,3% de los bosques nativos del territorio nacional.

El tipo forestal lenga se distribuye desde los 36° (Cordillera de Talca) hasta los 56°S (Tierra del Fuego) a lo largo de la Cordillera de Los Andes formando el límite altitudinal arbóreo sobre los 1.000 m s.n.m. En su distribución sur crece bajo los 700 m s.n.m., hasta encontrarse con el mar en Magallanes.

### Clima y suelos

La especie se desarrolla sobre un amplio rango ecológico derivado de su amplia distribución latitudinal, prefiriendo bajas temperaturas, precipitación en forma de nieve y fuertes vientos. En su distribución más septentrional se asocia a un clima templado cálido con influencia mediterránea (Montaldo, 1966 y Donoso, 1993; citados de Donoso, 2006).

En la cordillera de Los Andes lenga crece en suelos trumao que varían de delgados a medianamente profundos, desarrollados sobre rocas volcánicas andesíticas y basálticas cuaternarias cubiertas por capas de cenizas volcánicas post glaciales, pumicitas y materiales más gruesos de gravas, arenas o escorias volcánicas. En Magallanes y Tierra del Fuego, los suelos se desarrollan esencialmente sobre materiales glaciares con depósitos de cenizas volcánicas (Donoso, 2006).

Los bosques de *N. pumilio* presentan estructuras coetáneas y multietáneas, como consecuencia de la interacción de procesos alogénicos y autogénicos. Estos procesos hacen que los bosques no se presenten en un estado de equilibrio, manteniéndose en una relativa fase sucesional temprana (López *et al.*, 2003).

### 2.3 Selección de las unidades de estudio

De la información disponible, de acuerdo a Drake *et al.* (2003), existen tres sectores muestreados para la elaboración de funciones de biomasa para la especie lenga, una de ellas corresponde a biomasa de corteza, cuyo estudio se realizó en localidad de Coyhaique, XI región, y los otros dos sectores ubicados en la XII región localidades de Porvenir (Garib, 1996) y Punta Arenas (Mosqueda, 1995) en los cuales se generaron funciones de diferentes componentes. No obstante, en la compilación no se informa acerca de número de individuos muestreados ni errores de las funciones construidas.

Por otra parte Caldentey (1995), realizó un estudio en la XII región, sector de Tierra del Fuego, donde muestrearon 91 árboles en tres distintos estados de desarrollo. En este caso, las funciones de biomasa no fueron construidas mediante obtención de peso húmedo in situ del total de los componentes, sino que fueron desarrolladas en base a sub muestras de cada componente. Existen además otros estudios que desarrollan modelos fustales para lenga en la Región de Magallanes (Oyarzún, 2008) y funciones alométricas de biomasa para árboles menores de 4m de altura y menores de 7cm de diámetro (Schmidt *et al.*, 2009). Por otra parte, las estimaciones de biomasa para la construcción de la línea de base del proyecto de captura de carbono Río Cóndor realizado por método indirecto a partir de inventarios y conversión de volumen a biomasa a través de la densidad básica de la madera, no se encuentran publicados (Forestal Savia, 1998).

La ausencia de funciones de biomasa que comprendan todos los rangos diamétricos, la variabilidad latitudinal, zonas de crecimiento y manejo de la especie, llevaron a muestrear cinco sitios distribuidos en tres regiones a lo largo de la distribución de Lenga (Campo Digital, 2013). La distribución de la muestra cubrió un rango diamétrico desde 11 cm hasta 139 cm y la selección individual estuvo dirigida a completar diámetros objetivos para asegurar la adecuada representación de la especie. Se seleccionaron 30 individuos en Carranco-Neltume, 13 en El Sauco, 5 en El Tordo, 29 en Quepuca Ralco, 12 en Trapananda, Cuadro 2.

No obstante la selección de los árboles estuvo dirigida a árboles sin daño aparente, la mayor parte de ellos presentó pudrición central en diferentes grados, lo que aportó importante variabilidad a los resultados.

## 2. Área de estudio y selección de la muestra

Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (LENGA)

**Cuadro 2 Características dasométricas y edad de los árboles muestreados por sitio.**

| Sitio         | Diámetro (cm) |       | Altura (m) |       | Edades (años) |        | Nro. de árboles muestreados |
|---------------|---------------|-------|------------|-------|---------------|--------|-----------------------------|
|               | Menor         | Mayor | Menor      | Mayor | Mínima        | Máxima |                             |
| Quepuca-Ralco | 11            | 89    | 10,0       | 24,0  | 39            | 283    | 29                          |
| Carranco      | 11            | 88    | 8,5        | 23,4  | 44            | 305    | 30                          |
| El Sauco      | 12            | 139   | 11,0       | 29,0  | 29            | 367    | 13                          |
| El Tordo      | 19            | 59    | 15,5       | 21,5  | 62            | 169    | 5                           |
| Trapananda    | 11            | 90    | 10,0       | 20,0  | 31            | 247    | 12                          |

## 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Mediciones de terreno y obtención de muestras

Este estudio aplicó el método de cosecha para la contabilidad de la biomasa de los individuos seleccionados, logrando el pesaje directo de las estructuras aéreas, Figura 2 y 3. El método utilizado está basado en el Manual de Procedimientos, Muestreos de Biomasa Forestal (Schlegel *et al.* 2000), elaborado por la UACH para el “*Proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono de los bosques de Chile y su promoción en el mercado mundial*”.



Figura 2.  
Pesaje de follaje con dinamómetro digital, Lenga. Foto gentileza CAMPO DIGITAL

Los pesajes de terreno y toma de muestras los efectuó la empresa CAMPO DIGITAL, mientras los análisis de laboratorio, elaboración de las bases de datos y manejo estadístico correspondieron al programa Bosques Pro Carbono de la Universidad Austral de Chile. El presente informe describe los procedimientos de análisis y entrega las funciones alométricas para biomasa aérea de Lengua, de acuerdo con los términos de referencia del proyecto desarrollado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF).



Figura 3.  
Mediciones de espesor de corteza en terreno, Lengua. Foto gentileza CAMPO DIGITAL

## 3.2 Procesamiento de las muestras en laboratorio

### Determinación del contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se utilizó como referencia la norma chilena NCH 176/1-Of1984, utilizando el procedimiento de secado en estufa a 105°C. Dependiendo del tamaño de la muestra el tiempo de secado tomó varios días hasta alcanzar peso constante. Las muestras de fuste comprendieron cuñas radiales que incorporaron desde la medula a la corteza, para dos posiciones de altura en el fuste

### 3. Metodología

(DAP y 50% de altura). Además, se determinó la humedad de ramas y follaje. De forma correspondiente se determinó el contenido de humedad de la corteza para dos posiciones en el fuste (DAP y 50% de la altura), Cuadro 3.

| Cuadro 3 Detalle muestras de humedad procesadas |               |                   |
|---|---------------|-------------------|
| Componente                                      | Posición      | Total de muestras |
| Fuste   | DAP           | 175               |
|   | 50% altura    | 175               |
| Corteza   | DAP           | 178               |
|   | 50% altura    | 175               |
| Copa  | Rama          | 89                |
|   | Ramas + Hojas | 178               |
|   | Hojas         | 180               |
| <b>TOTAL</b>                                    |               | <b>1.150</b>      |

#### Determinación de la densidad básica de la madera

De las muestras individuales. Para la determinación se utilizó como referencia la norma chilena NCH176/2-1986, utilizando los procedimientos contemplados para determinación de densidad en probetas irregulares. Esto es mediante la inmersión de probetas saturadas y medición del desplazamiento volumétrico por diferencia de pesadas, valor que se contrasta con el peso anhidro de la probeta. Se realizaron 441 determinaciones de densidad básica; 174 para fuste, 89 para ramas y 178 para corteza.

Variabilidad por condición fitosanitaria de individuos. Se caracterizaron las muestras de fuste de acuerdo a su condición: "sano", con ataque de larvas, con pudrición o médula con pudrición, para analizar la variabilidad de la densidad básica del fuste bajo estas condiciones, Figura 4.

#### Determinación del contenido de carbono y cenizas

Para la determinación del contenido de carbono en la biomasa se utilizó el método gravimétrico. Muestras de 2 g de biomasa seca triturada se sometieron a combustión en mufla, a 500°C durante 6 horas. Dado que la biomasa seca = materia orgánica + cenizas, el contenido de carbono (CC) se obtiene de la relación positiva con la materia orgánica (MO). El coeficiente utilizado fue  $MO/CC=1,917$  (Larney *et al.*, 2005).

Las determinaciones de este estudio comprendieron una selección representativa que incluyó los componentes del árbol fuste, ramas, corteza y hojas en las posiciones DAP y Altura al 50% del árbol (50%H), Cuadro 4.



Figura 4.  
Ejemplo del estado sanitario de los árboles muestreados. Rodajas de lenga para determinación de edad indican orientación y número de árbol

Cuadro 4 Detalle muestras de carbono para Lengua

| Componente   | Posición | Total de muestras |
|--------------|----------|-------------------|
| Fuste        | DAP      | 90                |
|              | 50%H     | 90                |
| Ramas        |          | 90                |
| Corteza      | DAP      | 89                |
|              | 50%H     | 89                |
| Hojas        |          | 90                |
| <b>TOTAL</b> |          | <b>538</b>        |

#### Determinación de la edad de los árboles

Se empleó el método convencional de conteo de anillos con empleo de estéreo microscopio Olympus Modelo SZ51, sobre rodela completa de todos los árboles estudiados. No obstante en 17 de los 90 árboles fue imposible la medición exacta debido a la pudrición o ausencia de la médula.

### 3.3 Análisis estadístico y desarrollo de funciones

El análisis estadístico comprendió tanto la parte descriptiva como de inferencia. En lo esencial se trabajó en el ajuste de diferentes modelos para describir relaciones estadísticamente significativas, con un nivel de confianza de 95%, entre biomasa aérea (BA) y una o dos variables independientes (DAP y altura total), Cuadro 5. Se probaron 24 modelos simples, polinómicos y transformaciones Box Cox de un factor y no lineales para dos factores, Cuadro 6. La selección de los modelos comprendió comparaciones de términos de error y de ajuste. Entre ellos, un P-valor en la tabla ANOVA menor que 0,05; un estadístico R-Cuadrado superior a 90% que indica el porcentaje de la variabilidad que es explicada por el modelo; y, correlaciones sobre 0,95 indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. También se observó el error estándar del estimador que indica el valor de la desviación estándar de los residuos y el error absoluto medio (MAE) o valor promedio de los residuos. Todos los modelos simples incorporan el estadístico de Durbin-Watson (DW) que examina los residuos, para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Todo valor de P mayor que 0,05 en este estadístico indica ausencia de auto correlación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0% y robustez del modelo. Además, para todos los modelos se informa una expresión del sesgo y error como las diferencias medias agregadas (DIFA) y la raíz del error medio cuadrático (REMC).

**Cuadro 5. Modelos probados en el análisis**

|                          |                               |                               |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Lineal                   | Y inversa raíz cuadrada de X  | Doble inverso                 |
| Raíz cuadrada de Y       | Y cuadrada raíz cuadrada de X | Y cuadrado X inversa          |
| Exponencial              | LOG X                         | X cuadrado                    |
| Y inversa                | Multiplicativa                | Raíz cuadrada de Y X cuadrado |
| Y cuadrada               | Y inversa LOG X               | Y inversa X cuadrado          |
| Raíz cuadrada de X       | Cuadrado Y LOG X              | Doble cuadrado                |
| Doble raíz cuadrada      | X inversa                     | Transformaciones Box Cox      |
| LOG Y Raíz cuadrada de X | Raíz cuadrada de Y X inversa  | No lineales (4)               |

## 4. RESULTADOS

Con la finalidad de facilitar la comprensión del proceso de validación de la base de datos y sus resultados, se presentan una serie de análisis previos y complementarios al estudio de funciones de biomasa propiamente tal.

### 4.1 Relaciones de esbeltez de los árboles de la muestra

La Figura 5 presenta la distribución de tamaños de árbol incluidos en el estudio de funciones y una relación entre DAP y altura total del fuste, Cuadro 6.

**Cuadro 6. Análisis de varianza, regresión altura total del fuste versus DAP, Lengua**

| Fuente                         | Suma de Cuadrados | Grados libertad | Cuadrado Medio               | Razón-F | Valor-P |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|---------|---------|
| Modelo                         | 0,0241            | 1               | 0,0241                       | 166,15  | 0,0000  |
| Residuo                        | 0,0126            | 87              | 0,0001                       |         |         |
| <b>Total</b>                   | <b>0,0367</b>     | <b>88</b>       |                              |         |         |
| <b>Estadísticos del modelo</b> |                   |                 |                              |         |         |
| Coefficiente correlación       |                   | 0,8101          | Durbin-Watson                | 2,0087  | 0,5123  |
| R-cuadrada                     |                   | 65,6331         | Auto correlación de residuos |         | 0,0129  |
| Error estándar del estimador   |                   | 0,0120          |                              |         |         |

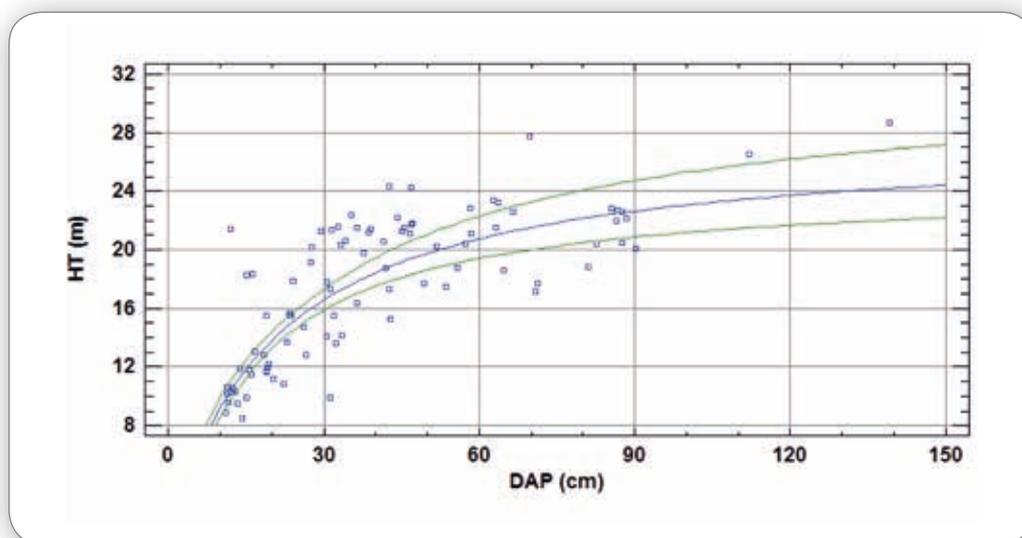


Figura 5.  
Relaciones de esbeltez para Lengua  
Modelo:  $HT = 1/(0,0361354 + 0,723695/DAP)$

## 4. Resultados

### 4.2 Relaciones entre DAP y edad de los árboles muestra

La figura 6 presenta la relación entre el DAP de los árboles del estudio y su edad determinada en laboratorio. En los sitios estudiados, las edades fluctuaron entre 29 y 305 años, Cuadro 7. Para los dos árboles con los mayores diámetros no fue posible contabilizar la edad por presentar pudrición central, aunque su edad proyectada puede superar los 350 años.

**Cuadro 7. Análisis de varianza, regresión altura total fuste versus DAP, Lengua**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI        | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|-----------|----------------|---------|---------|
| Modelo       | 1,67431E10        | 1         | 1,67431E10     | 181,54  | 0.0000  |
| Residuo      | 6,6406E9          | 72        | 9,22305E7      |         |         |
| <b>Total</b> | <b>2,33837E10</b> | <b>73</b> |                |         |         |

Se analizó la razón de esbeltez (altura en m/ DAP en cm) sin encontrar diferencias significativas entre los sitios estudiados (Coyhaique, Ralco y Neltume), con un valor promedio de 0,62.

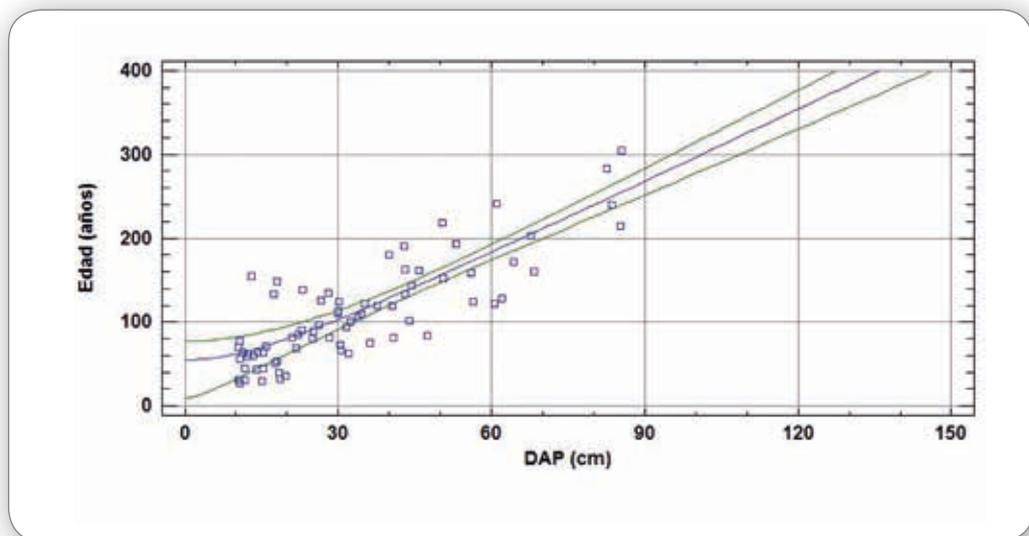


Figura 6.  
Relaciones entre DAP y edad, Lengua. Modelo:  $\text{Edad} = \text{SQRT}(2998,49 + 8,50658 \cdot \text{DAP}^2)$   
Coeficiente de Correlación = 0,8462; R-cuadrada = 71,60 por ciento.

Por otra parte, la variabilidad de crecimiento entre sitios se aprecia en la Figura 7. La muestra de Ralco aparece como la de menor crecimiento en altura con respecto a la edad, correspondiente con el sitio de mayor altitud.

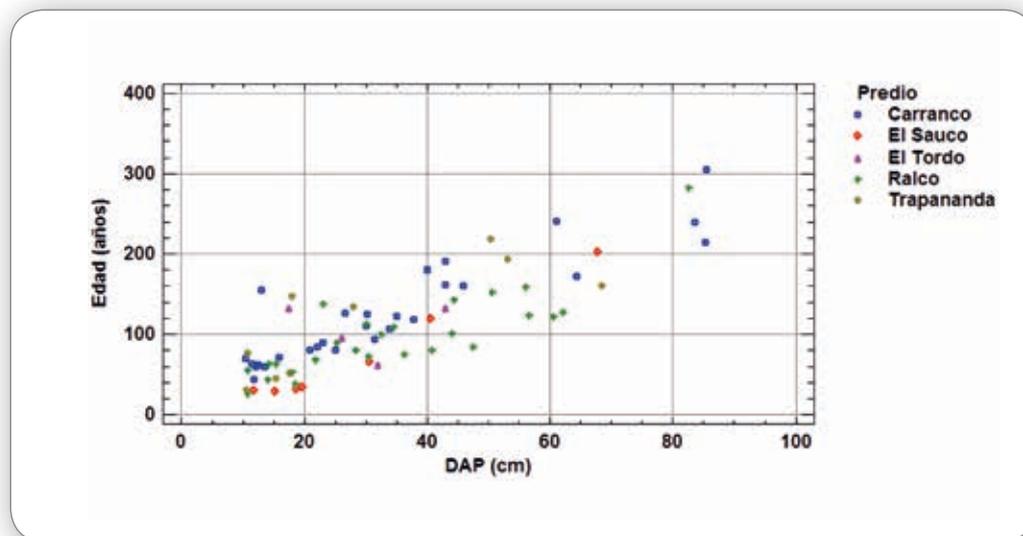


Figura 7.  
Relaciones DAP-altura total para los diferentes sitios, Lengua

### 4.3 Participación de los componentes del árbol

Se determinó la participación de cada componente del árbol en base peso seco, resultando el fuste sin corteza un 72% del peso de la biomasa aérea, Cuadro 8, Figura 8. Esta proporción varía en un amplio rango entre 47% y 85%, correspondiente con árboles sin manejo de bosques adultos o adulto renewal. Cabe destacar que este estudio no comprendió la estimación de biomasa radicular, lo que se espera medir en etapas posteriores.

Cuadro 8. Porcentaje promedio por componente con intervalos de confianza del 95%, Lengua

| Componente   | Recuento   | Promedio %    | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo      | Máximo       |
|--------------|------------|---------------|---------------------|----------------|-------------|--------------|
| Corteza      | 90         | 7,96          | 2,34                | 0,25           | 2,59        | 15,62        |
| Fuste        | 90         | 71,89         | 7,72                | 0,81           | 47,14       | 84,98        |
| Hoja         | 90         | 1,57          | 1,06                | 0,11           | 0,09        | 5,71         |
| Rama         | 90         | 18,58         | 8,35                | 0,88           | 2,90        | 43,29        |
| <b>Total</b> | <b>360</b> | <b>100,00</b> | <b>28,38</b>        | <b>1,50</b>    | <b>0,09</b> | <b>84,98</b> |

## 4. Resultados

La participación de las hojas tiene carácter sólo informativo, ya que su contabilidad como parte de la biomasa puede ser discutida en especies caducifolias; las hojas de un periodo formarán parte de la hojarasca en el periodo siguiente.

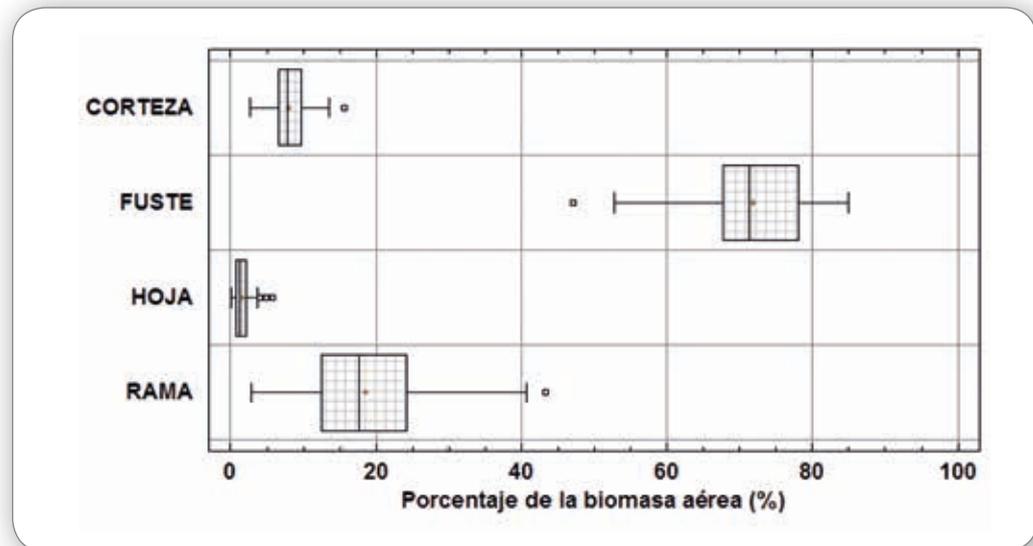


Figura 8.  
Variabilidad en la participación de los componentes del árbol, Lengua

### Coeficiente de expansión de biomasa.

El coeficiente de expansión de biomasa correspondiente a Lengua para llevar el peso del fuste sin corteza a peso de la biomasa aérea del árbol varía ampliamente entre 1,18 y 2,12 con un promedio de 1,41 (BEF).

### 4.4 Variaciones del contenido de Humedad

El contenido de humedad presentó amplia variabilidad y diferencias significativas entre los componentes del árbol, Cuadros 9 y 10, Figura 9. La corteza presenta menor contenido de humedad que la madera de fuste probablemente debido a que las muestras se obtuvieron en la temporada estival. Las diferencias sugieren la necesidad de determinar los pesos secos de la biomasa aplicando los contenidos de humedad correspondientes a cada componente por separado.

**Cuadro 9. Análisis de varianza para contenido de humedad por componente, Lengua**

| Fuente       | Suma de Cuadros  | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 951249           | 3          | 317083         | 977,47  | 0,0000  |
| Intra grupos | 166088           | 512        | 324            |         |         |
| <b>Total</b> | <b>1,11734E6</b> | <b>515</b> |                |         |         |

Cuadro 10. Resumen estadístico para contenido de humedad por componente, Lengua

| Componente   | Recuento   | Promedio %   | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo       | Máximo        |
|--------------|------------|--------------|---------------------|----------------|--------------|---------------|
| Corteza      | 175        | 64,30        | 15,29               | 1,16           | 19,57        | 106,91        |
| Fuste        | 165        | 81,08        | 16,47               | 1,28           | 26,84        | 125,75        |
| Hoja         | 89         | 187,08       | 27,52               | 2,92           | 136,09       | 253,44        |
| Rama         | 87         | 94,40        | 12,88               | 1,38           | 69,88        | 160,06        |
| <b>Total</b> | <b>516</b> | <b>95,92</b> | <b>46,58</b>        | <b>2,05</b>    | <b>19,57</b> | <b>253,44</b> |

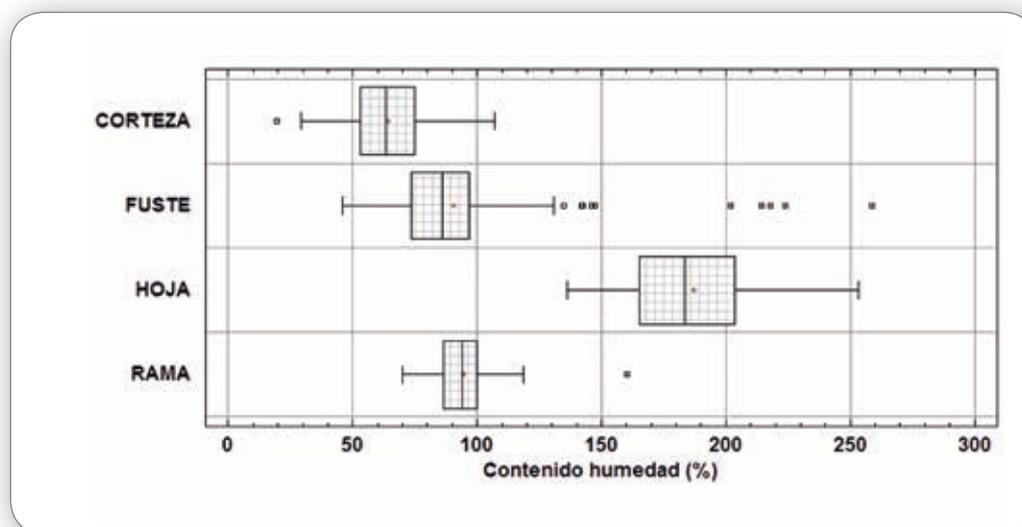


Figura 9.  
Variabilidad del contenido de humedad por componente del árbol, Lengua

### Contenido de humedad del fuste

El análisis de varianza demuestra que no hay diferencias significativas en el contenido de humedad por posición en el fuste, Cuadro 11. Por lo tanto los datos de humedad de fuste pueden ser analizados como una sola muestra. Esta situación difiere de los resultados de otros estudios para otras especies, que señalan un aumento del contenido de humedad con la posición en altura en el fuste (CONAF, 2013a; CONAF, 2013b).

Cuadro 11. Análisis de varianza para Contenido de humedad por posición en el fuste

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 1,2               | 1          | 1,23           | 0,00    | 0,95    |
| Intra grupos | 44497,8           | 163        | 272,99         |         |         |
| <b>Total</b> | <b>44499,1</b>    | <b>164</b> |                |         |         |

## 4. Resultados

Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas al 95% de confianza en el contenido de humedad del fuste entre los sitios estudiados, Cuadro 12 y 13. Se observa en los árboles ubicados en los sitios de XI Región menor contenido de humedad que sitios de las Regiones XIV y VIII.

**Cuadro 12. Análisis de varianza del Contenido de Humedad por sitio**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 4591,33           | 4          | 1147,83        | 4,60    | 0,0015  |
| Intra grupos | 39907,70          | 160        | 249,42         |         |         |
| <b>Total</b> | <b>44499,10</b>   | <b>164</b> |                |         |         |

**Cuadro 13. Resumen estadístico para el contenido de humedad del fuste entre sitios**

| Comuna (Región)     | Predio     | Recuento   | Promedio %   | Desviación Estándar | Error Estándar |
|---------------------|------------|------------|--------------|---------------------|----------------|
| Alto Bio Bío (VIII) | Ralco      | 57         | 84,6         | 17,07               | 2,26           |
| Panguipulli (XIV)   | Carranco   | 53         | 84,66        | 14,18               | 1,95           |
| Coyhaique (XI)      | El Tordo   | 8          | 69,52        | 19,46               | 6,88           |
|                     | Trapananda | 22         | 71,11        | 18,59               | 3,96           |
|                     | El Sauco   | 25         | 78,91        | 11,60               | 2,32           |
| <b>Total</b>        |            | <b>165</b> | <b>81,07</b> | <b>16,47</b>        | <b>1,28</b>    |

### Contenido de humedad en ramas.

El análisis de varianza indica que no hay diferencias estadísticamente significativas para el contenido de humedad de las ramas entre sitios, Cuadros 14 y 15.

**Cuadro 14. Análisis de varianza para el contenido de humedad de ramas**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI        | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|-----------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 1252,0            | 4         | 312,98         | 1,97    | 0,1064  |
| Intra grupos | 13014,5           | 82        | 158,71         |         |         |
| <b>Total</b> | <b>14266,5</b>    | <b>86</b> |                |         |         |

**Cuadro 15. Resumen estadístico para contenido de humedad de ramas entre sitios (%)**

| Predio       | Recuento  | Promedio %   | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo       | Máximo        |
|--------------|-----------|--------------|---------------------|----------------|--------------|---------------|
| Carranco     | 30        | 97,75        | 12,36               | 2,25           | 70,25        | 117,7         |
| El Sauco     | 13        | 89,78        | 7,61                | 2,11           | 75,55        | 98,04         |
| El Tordo     | 5         | 103,71       | 13,93               | 6,23           | 89,37        | 118,49        |
| Ralco        | 29        | 92,45        | 15,48               | 2,87           | 69,88        | 160,06        |
| Trapananda   | 10        | 91,35        | 6,60                | 2,09           | 81,65        | 101,03        |
| <b>Total</b> | <b>87</b> | <b>94,40</b> | <b>12,87</b>        | <b>1,38</b>    | <b>69,88</b> | <b>160,06</b> |

### Contenido de humedad en follaje.

Mediante análisis de varianza se determina que existen diferencias significativas entre sitios para el contenido de humedad de hojas, Cuadro 16. En los cinco sitios estudiados, el contenido de humedad varía entre 182 y 208%, Cuadro 17.

**Cuadro 16. Análisis de varianza para contenido de humedad de hojas**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI        | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|-----------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 10451,5           | 4         | 2612,87        | 3,91    | 0,0059  |
| Intra grupos | 56182,3           | 84        | 668,84         |         |         |
| <b>Total</b> | <b>66633,8</b>    | <b>88</b> |                |         |         |

**Cuadro 17. Resumen estadístico para contenido de humedad de hojas entre sitios (%)**

| Predio       | Recuento  | Promedio %    | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo        | Máximo        |
|--------------|-----------|---------------|---------------------|----------------|---------------|---------------|
| Carranco     | 30        | 182,64        | 22,36               | 4,08           | 136,09        | 228,83        |
| El Sauco     | 13        | 192,92        | 27,61               | 7,65           | 137,17        | 234,90        |
| El Tordo     | 5         | 208,70        | 38,15               | 17,02          | 152,90        | 249,39        |
| Ralco        | 29        | 177,44        | 23,37               | 4,34           | 148,05        | 234,91        |
| Trapananda   | 12        | 206,19        | 32,18               | 9,29           | 155,00        | 253,44        |
| <b>Total</b> | <b>89</b> | <b>187,08</b> | <b>27,51</b>        | <b>2,91</b>    | <b>136,09</b> | <b>253,44</b> |

## 4.5 Variaciones de la densidad básica de la madera de lenga

La densidad básica presenta variaciones entre los componentes del árbol, corteza, fuste y rama, Cuadros 18 y 19, Figura 10. Se pudo constatar que el componente corteza es el más denso del árbol, seguido por las ramas y por último el fuste, este último afectado por diferentes grados de pudrición. La prueba de múltiples rangos demuestra que las diferencias significativas se producen entre los componentes corteza-fuste y fuste-rama. El valor de la densidad básica es correspondiente con estudios anteriores que informan un valor de 0,464 Mg/m<sup>3</sup> para madera aserrable (Pérez, 1983).

**Cuadro 18. Análisis de varianza para la densidad básica, Lengua**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,10              | 2          | 0,052          | 31,57   | 0,0000  |
| Intra grupos | 0,70              | 430        | 0,001          |         |         |
| <b>Total</b> | <b>0,81</b>       | <b>432</b> |                |         |         |

## 4. Resultados

**Cuadro 19. Resumen estadístico para la densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ) entre componentes**

| Componente   | Recuento   | Promedio $\text{Mg/m}^3$ | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo       | Máximo       | Grupos homogéneos |
|--------------|------------|--------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|
| Corteza      | 175        | 0,508                    | 0,047               | 0,0035         | 0,385        | 0,630        | A                 |
| Fuste        | 170        | 0,477                    | 0,040               | 0,0031         | 0,365        | 0,572        | B                 |
| Rama         | 88         | 0,510                    | 0,026               | 0,0028         | 0,423        | 0,576        | B                 |
| <b>Total</b> | <b>433</b> | <b>0,496</b>             | <b>0,043</b>        | <b>0,0021</b>  | <b>0,365</b> | <b>0,630</b> |                   |

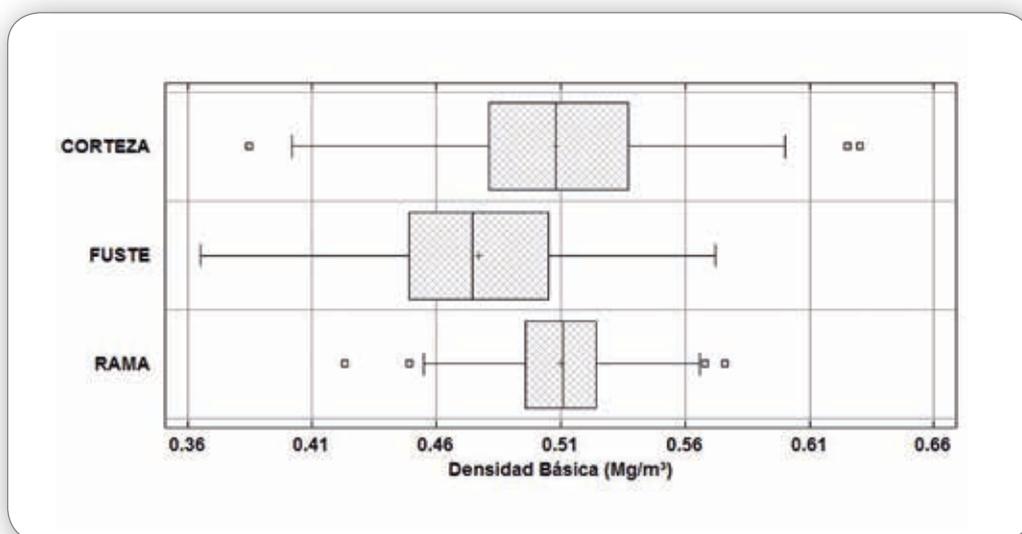


Figura 10.  
Variabilidad de la densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ) de árboles muestreados por componente

Se observa que existen diferencias significativas entre los datos de densidad básica según posición en el fuste, disminuyendo ligeramente en altura, Cuadro 20 y 21, Figura 11.

**Cuadro 20. Análisis de varianza para las secciones fustales DAP y diámetro al 50%**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,0241            | 1          | 0,0241         | 16,33   | 0,0001  |
| Intra grupos | 0,2483            | 168        | 0,0014         |         |         |
| <b>Total</b> | <b>0,2724</b>     | <b>169</b> |                |         |         |

**Cuadro 21. Resumen estadístico de densidad básica para las secciones fustales DAP y diámetro al 50%**

| Posición     | Recuento   | Promedio $\text{Mg/m}^3$ | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo       | Máximo       |
|--------------|------------|--------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------|
| DAP          | 87         | 0,4885                   | 0,0405              | 0,0043         | 0,365        | 0,572        |
| P50          | 83         | 0,4647                   | 0,0361              | 0,0039         | 0,388        | 0,553        |
| <b>Total</b> | <b>170</b> | <b>0,4769</b>            | <b>0,0401</b>       | <b>0,0030</b>  | <b>0,365</b> | <b>0,572</b> |

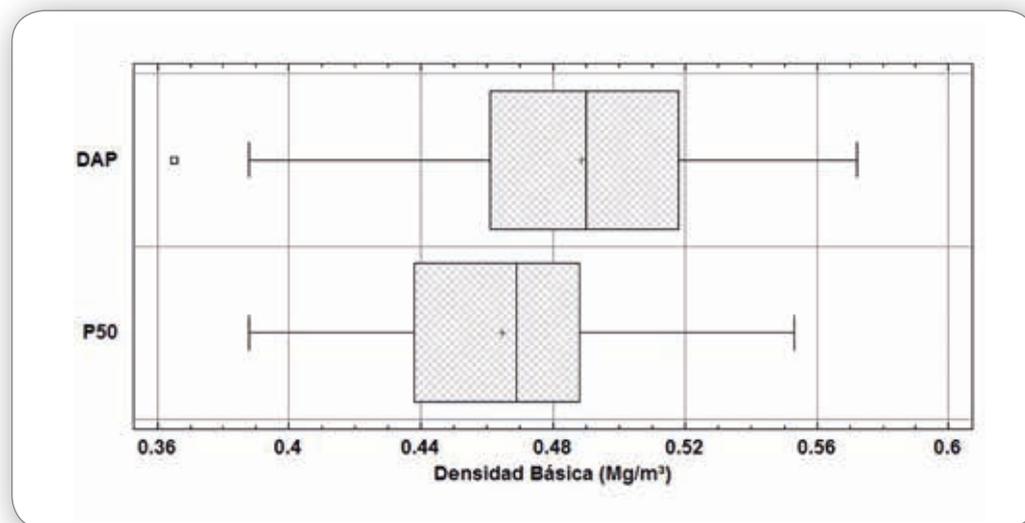


Figura 11.  
Variabilidad de densidad básica ( $\text{Mg/m}^3$ ) por sección del fuste

Además, la densidad básica se ve afectada por el estado sanitario de la muestra, cuyas diferencias significativas se comprobaron mediante análisis de varianza, separando a aquellos individuos con daños fitosanitarios de los “sanos”, Cuadro 22 y 23. Los menores valores corresponden a pudrición central o de médula, los que pueden ser hasta 13% inferiores a madera sana.

**Cuadro 22. Análisis de varianza para densidad básica, sección DAP (del fuste) segregado por estado fitosanitario**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | Gl        | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|-----------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 36630             | 2         | 18315,3        | 14,71   | 0,0000  |
| Intra grupos | 104567            | 84        | 1244,84        |         |         |
| <b>Total</b> | <b>141197</b>     | <b>86</b> |                |         |         |

**Cuadro 23. Resumen estadístico densidad básica para la sección DAP segregados por estado fitosanitario**

| Sanidad       | Recuento  | Promedio $\text{Mg/m}^3$ | Desviación Estándar | Error Estándar | Mínimo       | Máximo       |
|---------------|-----------|--------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------|
| Ataque larvas | 24        | 484,3                    | 33,73               | 6,88           | 415,0        | 542,0        |
| Pudrición     | 10        | 435,2                    | 38,78               | 12,26          | 365,0        | 488,0        |
| Sano          | 53        | 500,6                    | 35,31               | 4,85           | 422,0        | 572,0        |
| <b>Total</b>  | <b>87</b> | <b>488,6</b>             | <b>40,51</b>        | <b>4,34</b>    | <b>365,0</b> | <b>572,0</b> |

## 4. Resultados

### 4.6 Contenido de carbono

Los resultados muestran diferencias significativas en el contenido de carbono de los componentes del árbol, el mayor contenido de carbono aparece asociado al tejido vegetal del fuste y el menor a las hojas, Cuadro 24 y 25, Figura 12.

**Cuadro 24. ANOVA para contenido de carbono (kg/kg) por componente**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 0,0966            | 3          | 0,032214       | 821,08  | 0,0000  |
| Intra grupos | 0,0208            | 530        | 0,000039       |         |         |
| <b>Total</b> | <b>0,1174</b>     | <b>533</b> |                |         |         |

**Cuadro 25. Resumen estadístico para contenido de carbono por componente**

| Componente   | Recuento   | Promedio kg/kg | Desviación Estándar | Mínimo       | Máximo       |
|--------------|------------|----------------|---------------------|--------------|--------------|
| Corteza      | 177        | 0,4916         | 0,0083              | 0,464        | 0,511        |
| Fuste        | 177        | 0,5203         | 0,0027              | 0,496        | 0,522        |
| Hojas        | 90         | 0,4893         | 0,0079              | 0,467        | 0,503        |
| Rama         | 90         | 0,5098         | 0,0046              | 0,496        | 0,519        |
| <b>Total</b> | <b>534</b> | <b>0,5038</b>  | <b>0,0148</b>       | <b>0,464</b> | <b>0,522</b> |

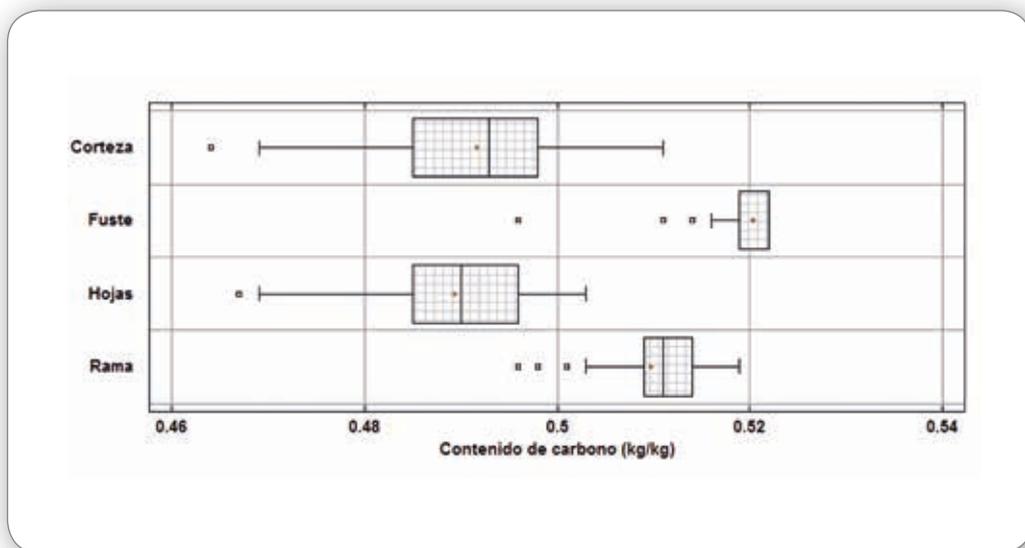


Figura 12. Variabilidad de contenido de carbono (kg/kg) por componente, Lengua

## 4.7 Contenido de cenizas

El contenido de cenizas muestra diferencias significativas entre los componentes del árbol, Cuadros 26 y 27, Figura 13. Corteza y hojas presentan los mayores contenidos.

**Cuadro 26. ANOVA para contenido de cenizas (%) por componente**

| Fuente       | Suma de Cuadrados | GI         | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------|-------------------|------------|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 3524,95           | 3          | 1174,98        | 818,17  | 0,0000  |
| Intra grupos | 761,14            | 530        | 1,43611        |         |         |
| <b>Total</b> | <b>4286,09</b>    | <b>533</b> |                |         |         |

**Cuadro 27. Resumen estadístico para contenido de cenizas (%) por componente**

| Componente   | Recuento   | Promedio    | Desviación Estándar | Mínimo   | Máximo      |
|--------------|------------|-------------|---------------------|----------|-------------|
| Corteza      | 177        | 5,76        | 1,59                | 2,0      | 11,0        |
| Fuste        | 177        | 0,29        | 0,50                | 0        | 5,0         |
| Hojas        | 90         | 6,21        | 1,52                | 3,5      | 10,5        |
| Rama         | 90         | 2,28        | 0,89                | 0,5      | 5,0         |
| <b>Total</b> | <b>534</b> | <b>3,43</b> | <b>2,84</b>         | <b>0</b> | <b>11,0</b> |

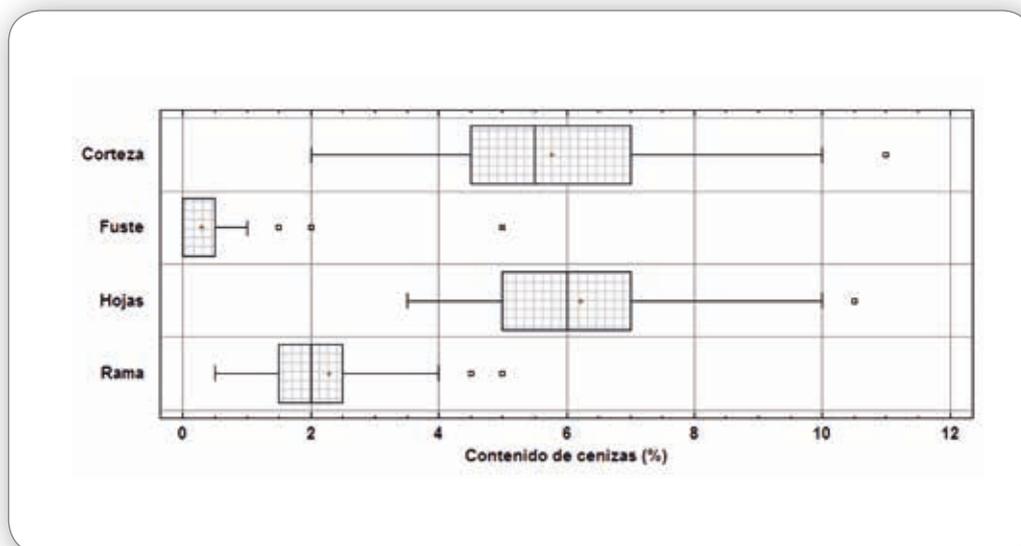


Figura 13.  
Variabilidad de contenido de cenizas (%) por componente, Lengua

## 4. Resultados

### 4.8 Desarrollo de funciones alométricas para la especie Lengua

#### 4.8.1 Biomasa aérea

Los principales modelos seleccionados corresponden a modelos multiplicativos y otros no lineales, Cuadro 28. La biomasa aérea en peso seco se identifica como BA en kilogramos, el diámetro a la altura del pecho con corteza como DAP en centímetros y la altura total del fuste como HT en metros. Los errores de los modelos son válidos para el rango de DAP comprendido entre 11 y 139 cm.

**Cuadro 28. Modelos seleccionados para biomasa aérea (BA)**

| Tipo           | Forma  | Variable independiente | Variabes independientes |
|----------------|--|------------------------|-------------------------|
| Multiplicativo | $Y = a \cdot X^b$  | BA (kg)                | DAP (cm)                |
| No lineal      | $Y = d + \text{EXP}(a + b \cdot X1 + c \cdot X2)$                                    | BA (kg)                | DAP (cm), HT (m)        |
| Box Cox        | BOX COX (Y) = $a + b \cdot X$<br>BOX COX (Y) = $\frac{1 + (Y^c - 1)}{(c \cdot d^f)}$ | BA (kg)                | DAP (cm)                |

En los siguientes cuadros resumen se presentan los estadísticos de los diversos modelos ajustados seleccionados, en especial los términos de error, Cuadros 29 a 31 y Figuras 14 y 15.

**Cuadro 29. Coeficientes de regresión modelo BA multiplicativo (Modelo 1)**

| Especie      | Lengua   | DAP mínimo = 11 cm         |                | DAP máximo = 138 cm |                   |
|--------------|--|----------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
|              |  | Mínimos Cuadrados Estimado | Estándar Error | Estadístico         | Valor-P           |
| Parámetro    |  |                            | T              | Valor-P             |                   |
| Intercepto   | -2,01699   | 0,115798                   | -17,4182       | 0,0000              | Intercepto= LN(a) |
| Pendiente    | 2,336  | 0,0327966                  | 71,2269        | 0,0000              |                   |
| Modelo       | BA (kg) = EXP (-2,01699 + 2,336*LN(DAP))   |                            |                |                     | $Y = a \cdot X^b$ |
| Estadígrafos | Coeficiente de Correlación = 0,9914; R <sup>2</sup> = 98,3 %; Error estándar del estimador = 0,2015; Error absoluto medio = 0,1626; Estadístico Durbin-Watson = 1,9642 (P=0,4306); RECM= 49,59%; DIFA= 5,49% |                            |                |                     |                   |

#### Análisis de varianza

| Fuente                   | Suma de Cuadrados | Grados libertad | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------|---------|
| Modelo                   | 206,078           | 1               | 206,078        | 5073,27 | 0,0000  |
| Residuo                  | 3,5745            | 88              | 0,0406         |         |         |
| <b>Total (Corregido)</b> | <b>209,653</b>    | <b>89</b>       |                |         |         |

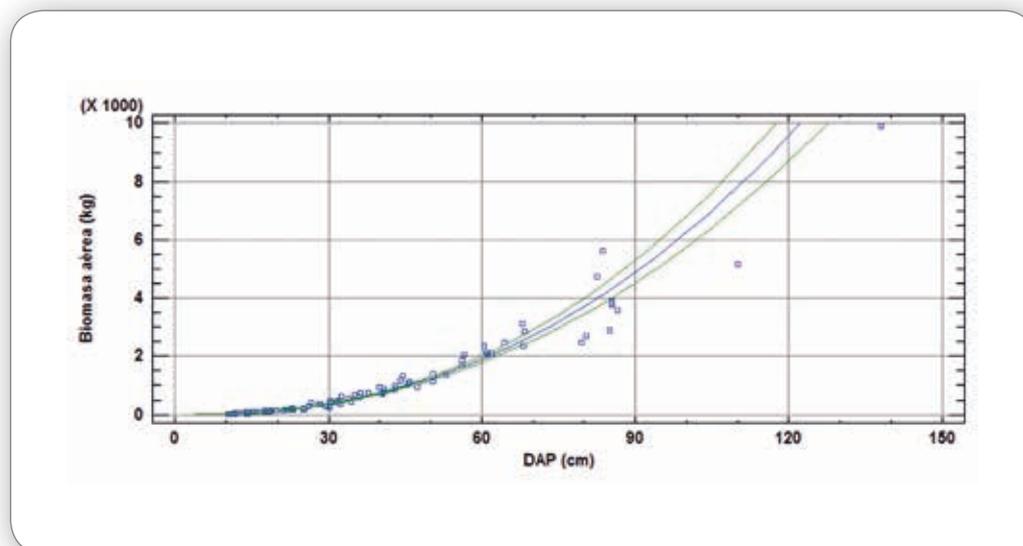


Figura 14.  
Modelo 1,  $BA = \text{EXP}(-2,01699 + 2,336 \cdot \text{LN}(\text{DAP}))$ , Lengua

La incorporación de la altura en los modelos disminuye el error y mejora la estimación de la biomasa. Sin embargo, persiste una cuota de error aportada por la variabilidad de la condición sanitaria de los árboles muestreados y la diversidad de sitios incluidos en el análisis.

Cuadro 30. Coeficientes de regresión modelo BA con dos variables independientes (Modelo 2)

| Especie      | Lengua   | DAP mínimo = 11 cm |                     | DAP máximo = 138 cm       |         |
|--------------|--|--------------------|---------------------|---------------------------|---------|
|              |  | Estimado           | Error Estándar      | Intervalo confianza a 95% |         |
| Parámetro    |  |                    | Asintótico Inferior | Asintótico Superior       |         |
| d            | -2418,7  | 359,778            | -3133,92            | -1703,48                  | d = 0,1 |
| a            | 7,5440   | 0,1690             | 7,2079              | 7,8801                    | a = 0,1 |
| b            | 0,0128   | 0,0008             | 0,0110              | 0,0146                    | b = 0,1 |
| c            | 0,0034   | 0,0034             | -0,0034             | 0,0103                    | c = 0,1 |
| Modelo       | $BA \text{ (kg)} = -2418,7 + \text{EXP}(7,54407 + 0,0128509 \cdot \text{DAP} + 0,00343871 \cdot \text{HT})$                            |                    |                     |                           |         |
| Estadísticos | $R^2 = 95,25\%$ ; Error estándar = 350,423; Error medio absoluto = 199,81; Estadístico Durbin-Watson = 1,7172; RECM=30,10% ; DIFA= 0 % |                    |                     |                           |         |

#### Análisis de varianza

| Fuente            | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio |
|-------------------|-------------------|----|----------------|
| Modelo            | 3,28454E8         | 4  | 8,21136E7      |
| Residuo           | 1,05605E7         | 86 | 122796,0       |
| Total             | 3,39015E8         | 90 |                |
| Total (Corregido) | 2,22451E8         | 89 |                |

## 4. Resultados

**Cuadro 31. Coeficientes de regresión modelo BA Box Cox (Modelo 3)**

| Especie                  | Lenga   | DAP mínimo = 11 cm         |                | DAP máximo = 138 cm |                                  |
|--------------------------|---|----------------------------|----------------|---------------------|----------------------------------|
|                          |   | Mínimos Cuadrados Estimado | Estándar Error | Estadístico         |                                  |
| Parámetro                |   |                            | T              | Valor-P             |                                  |
| Intercepto               | -89,5067  | 25,8652                    | -3,4605        | 0,0008              |                                  |
| Pendiente                | 31,1541   | 0,5515                     | 56,4825        | 0,0000              |                                  |
| Modelo                   | Box Cox(BA) = -89,5067 + 31,1541*DAP; dónde:<br>$\text{Box Cox(BA)} = \frac{1 + (\text{BA}^{0,473} - 1)}{(0,473 * 441,838^{-0,527})}$ |                            |                |                     | Potencia = 0,473<br>Cambio = 0,0 |
| Estadígrafos             | Coeficiente de Correlación = 0,9864; R2 = 97,31%; Error estándar = 133,096; REMC = 33,36%; DIFA = 6,75%                               |                            |                |                     |                                  |
| Análisis de varianza     |   |                            |                |                     |                                  |
| Fuente                   | Suma de Cuadrados   | Gl                         | Cuadrado Medio | Razón-F             | Valor-P                          |
| Modelo                   | 5,65144E7   | 1                          | 5,65144E7      | 3190,27             | 0.0000                           |
| Residuo                  | 1,55889E6   | 88                         | 17714,6        |                     |                                  |
| <b>Total (Corregido)</b> | <b>5,80733E7</b>  | <b>89</b>                  |                |                     |                                  |

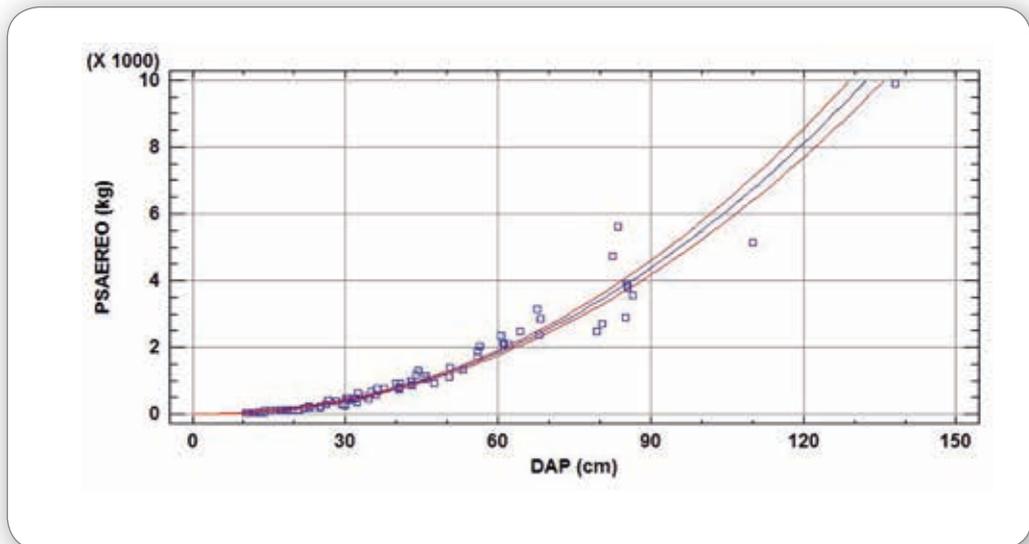


Figura 15.  
Modelo 3 Box Cox, biomasa aérea en kg en función del DAP (cm), Lengua

### 4.8.2 Funciones por componente

Se estimaron modelos para ramas y corteza siguiendo un procedimiento semejante al seguido para la biomasa aérea. Los Cuadros 32 y 33 resumen los estadísticos de los modelos ajustados, Figuras 16 y 17.

**Cuadro 32. Coeficientes de regresión modelo RAMAS multiplicativo (Modelo 4)**

| Especie      | Lenga  | DAP mínimo = 11 cm         |                | DAP máximo = 138 cm |                   |
|--------------|--|----------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
|              |  | Mínimos Cuadrados Estimado | Estándar Error | Estadístico         |                   |
|              |  |                            |                | T                   | Valor-P           |
| Intercepto   | -4,2602  | 0,2910                     | -14,6369       | 0,0000              | Intercepto= LN(a) |
| Pendiente    | 2,4659   | 0,0824                     | 29,9138        | 0,0000              |                   |
| Modelo       | RAMAS (kg) = EXP(-4,26021 + 2,46594*LN(DAP))   |                            |                |                     | $Y = a \cdot X^b$ |
| Estadígrafos | Coeficiente de Correlación = 0,9541; R <sup>2</sup> = 91,04%; Error estándar= 0,5065; Error absoluto medio = 0,3920; Estadístico Durbin-Watson = 1,78008 (P=0,1458); RECM= 73,39%; DIFA= 6,22% |                            |                |                     |                   |

#### Análisis de varianza

| Fuente            | Suma de Cuadrados | Grados libertad | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------|---------|
| Modelo            | 229,641           | 1               | 229,641        | 894,83  | 0,0000  |
| Residuo           | 22,5834           | 88              | 0,2566         |         |         |
| Total (Corregido) | 252,224           | 89              |                |         |         |

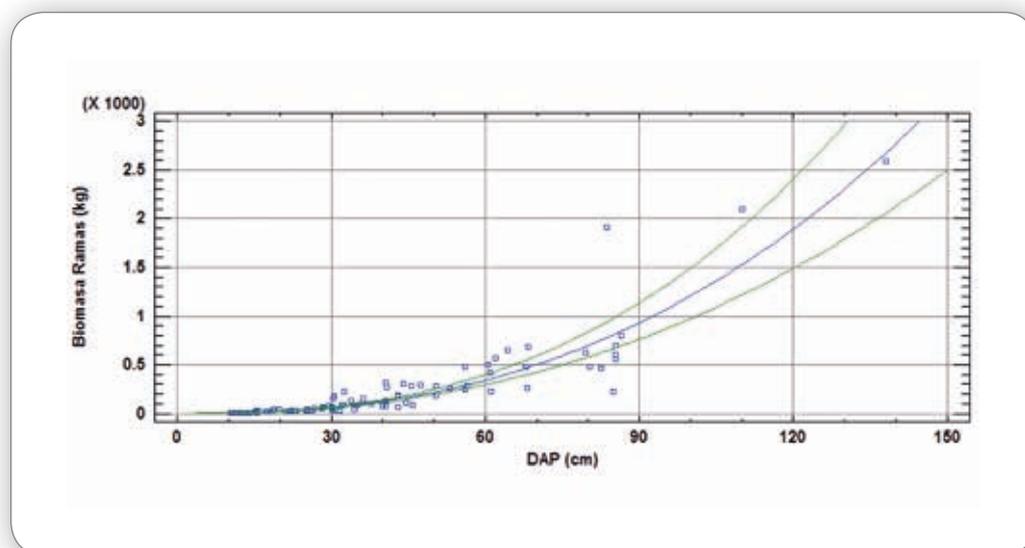


Figura 16.  
Modelo 4, Biomasa RAMAS (kg)= EXP (-4,260210+02,46594\* LN(DAP), Lengua

## 4. Resultados

**Cuadro 33. Coeficientes de regresión modelo CORTEZA multiplicativo (Modelo 5)**

| Especie      | Lenga  | DAP mínimo = 11 cm |             | DAP máximo = 138 cm |                      |
|--------------|--|--------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| Parámetro    | Mínimos Cuadrados Estimado   | Estándar Error     | Estadístico |                     |                      |
|              |  |                    | T           | Valor-P             |                      |
| Intercepto   | -3,8665  | 0,223989           | -17,262     | 0,0000              | Intercepto= LN(a)    |
| Pendiente    | 2,12624  | 0,0634387          | 33,5164     | 0,0000              |                      |
| Modelo       | RAMAS (kg) = EXP(-4,26021 + 2,46594*LN(DAP))   |                    |             |                     | Y = a*X <sup>b</sup> |
| Estadísticos | Coeficiente de Correlación = 0,9629; R2 = 92,73%; Error estándar = 0,3898; Error absoluto medio = 0,3112; Estadístico Durbin-Watson = 1,5955 (P=0,0256); RECM= 83,83%; DIFA= 1,84% |                    |             |                     |                      |

### Análisis de varianza

| Fuente                   | Suma de Cuadrados | Grados libertad | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------|---------|
| Modelo                   | 170,729           | 1               | 170,729        | 1123,35 | 0,0000  |
| Residuo                  | 13,3745           | 88              | 0,1519         |         |         |
| <b>Total (Corregido)</b> | <b>184,104</b>    | <b>89</b>       |                |         |         |

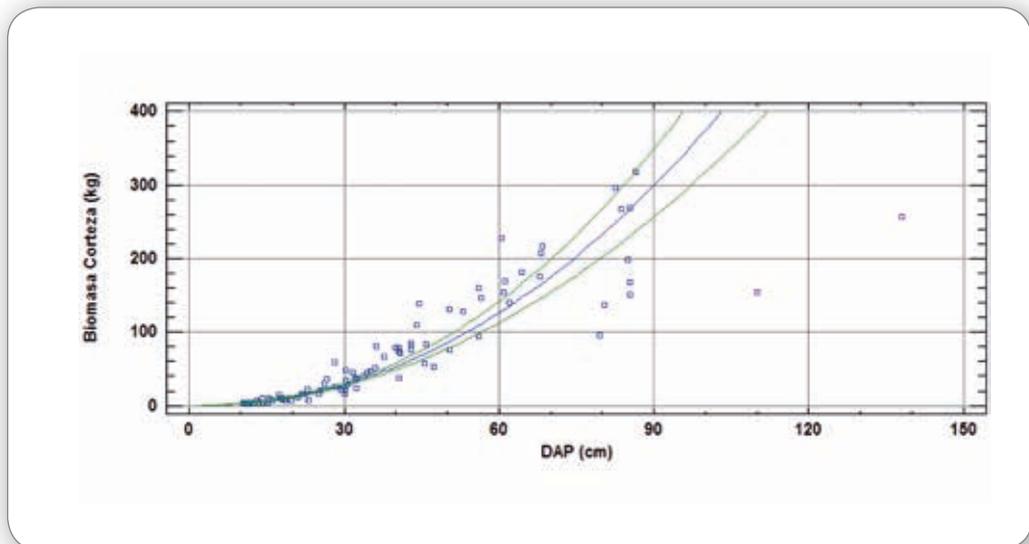


Figura 17.  
Modelo 5, Biomasa CORTEZA (kg)= EXP (-3,8665 + 2,12624\* LN(DAP), Lenga

## 5 COMENTARIOS FINALES

Las funciones recogen variabilidad de clima, suelo, disponibilidad de nutrientes, edad y manejo. Aunque se eligieron árboles sin daño externo aparente, gran parte de ellos mostraron pudrición central que se manifestó a lo largo del fuste.

A pesar del importante tamaño de la muestra, la variabilidad de la biomasa aérea conduce al error que se aprecia en las regresiones y que en el mejor de los casos alcanzó al 30,10% (RECM). No obstante, este error se considera razonable para la estimación de la biomasa aérea de los árboles y correspondiente acumulación de carbono a partir del DAP y altura total.

La eliminación en el modelo de los dos árboles mayores de 100 cm de DAP no dio como resultado un mejoramiento significativo del error por lo que se dejó toda la muestra. Otro aspecto que requiere discusión es si corresponde o no la cuantificación de la biomasa de las hojas en esta especie caducifolia.

Se tiene conocimiento de la existencia de estimaciones para la especie lenga en Tierra del Fuego, sin embargo no fue posible obtener esta información por no encontrarse publicada.

## 6 REFERENCIAS

- Álvarez C, A Lara. 2008. Growth of a young native species strip plantation in the Valdivian Andes, Chile. *Bosque* 29(3): 181-191, 2008.
- Caldentey, J. 1995. Acumulación de biomasa en rodales naturales de Lenga en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Investigación Agraria, Serie Sistemas y Recursos Forestales*. Madrid, España. Vol. 4. Nº2. 165-175.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 2001. Estudio Agrológico X Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Tomo I. Centro de Investigación de Recursos Naturales, Chile, 199 p.
- CONAF, 2013a. Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (ARAUCARIA). Secretaría Técnica Gerencia Forestal Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 45p.
- CONAF, 2013b. Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (ROBLE). Secretaría Técnica Gerencia Forestal Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 38p.
- CONAF, 2011. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios y actualizaciones. Periodo 1997 - 2011. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 25 p.
- CONAF, 1999. Inventario Forestal Nacional Extensivo. Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Proyecto CONAF-CONAMA-BIRF. Universidad Austral de Chile. 40p.
- Donoso, 2006. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: autoecología, 678 p.
- Drake F, P Emanuelli y E Acuña. 2003. Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo. Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo. Universidad de Concepción. 197 p.
- Enciclopedia de la Flora Chilena. 2013. Disponible en: <http://www.florachilena.cl/>
- Forestal SAVIA 1998. Rio Condor Carbon Sequestration Project. USIJI Uniform Reporting Document: Activities Implemented Jointly Under the Pilot Phase. Disponible: [http://unfccc.int/kyoto\\_mechanisms/aij/activities\\_implemented\\_jointly/items/1808.php](http://unfccc.int/kyoto_mechanisms/aij/activities_implemented_jointly/items/1808.php)
- Garib; IA. 1996. Rendimientos volumétricos en bosque de lenga (*Nothofagus pumilio*) sometidos a cortas de protección. Provincia de tierra del fuego, XII Región. Tesis de grado. Universidad de Chile, Santiago. 55 p.
- IREN. 1979. Perspectivas de desarrollo de recursos de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo: Caracterización Climática. Publicación 26. Intendencia Región de Aysén Chile.

- Larney F, B Ellert, A Olson 2005. Carbon, ash and organic matter relationships for feedlot manures and composts. *Can. J. Soil Sci.* 85: 261-264.
- López P, M Bava, J Antequera, S Héctor. 2003. Regeneración en un bosque de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser) sometido a un manejo de selección en grupos. BOSQUE; Lugar: Valdivia; Año: 2003 vol. 24 p. 13 - 21
- Mardones M, J Jara, J Vargas. 2007. El patrón hidrográfico de la cuenca del río Blanco: control tectónico y geomorfológico. *Revista de Geografía Norte Grande*, 38: 79-98 (2007).
- Martínez, P. 2004. Mapa de Reconocimiento de Suelos de la VIII Región del Bío-Bío (Sector Sur). Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Mosqueda, C. 1995. Rendimientos volumétricos en el raleo de un bosque de lenga (*Nothofagus pumilio*) en la XII Región. Tesis de grado. Universidad de Chile, Santiago. 68 p.
- Oyarzún C 2008. Construcción de un modelo fustal para lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. Et Endl), en la XII Región. Tes. Ing. Forestal. Universidad de Chile. Santiago, 65p.
- Pérez, V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas Santiago, Chile. Corporación Nacional forestal. 451 p.
- Schlatter, J.E. 1996. Reconocimiento de suelos en las zonas andina y trasandina, Coyhaique, XI Región. Informe Convenio N°231. Serie Técnica Facultad de Ciencias Forestales; UACH, Valdivia, Chile. 69 p.
- Schlegel B, J Gayoso, J Guerra 2000. Manual de Procedimientos. Muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 24p.
- Schmidt A, M Poulain, D Klein, K Krause, K Peña, H Schmidt, A Schulte 2009. Allometric above-belowground biomass equations for *Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) natural regeneration in the Chilean Patagonia. *Ann. For. Sci.* 66 (2009) 513
- Sistema Integrado de Información Territorial (SIIT), Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2013a. Clima y vegetación Región del Bío Bío. Clima. Disponible en: <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region8/clima.htm>
- Sistema Integrado de Información Territorial (SIIT), Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2013b. Clima y vegetación Región de Los Ríos. Clima. Disponible en: <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region14/clima.htm>

