

Agosto 2013



Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (ROBLE)

Unidad de Cambio Climático
Gerencia Forestal
Corporación Nacional Forestal

Jorge Gayoso
Programa Bosques PROCARBONO
Universidad Austral de Chile

Revisión Técnica
Angelo Sartori
Fabián Milla
Francoise Pincheira
Cristian Perez





Fotografía gentileza de Pablo Novoa B



CONTENIDOS

<i>Prólogo</i>	5
1 INTRODUCCIÓN	9
2 ÁREA DE ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Descripción general de la especie <i>Nothofagus obliqua</i>	12
2.3 Selección de las unidades de estudio	12
3 METODOLOGÍA	14
3.1 Mediciones de terreno y obtención de muestras	14
3.2 Procesamiento de las muestras en laboratorio	14
3.2.1 Determinación del contenido de humedad	14
3.2.2 Determinación de la densidad básica de la madera	16
3.2.3 Separación de ramillas y hojas	17
3.2.4 Determinación del contenido de carbono	17
3.2.5 Determinación de la edad de los árboles	18
3.3 Análisis estadístico y desarrollo de funciones	18
4 RESULTADOS	19
4.1 Relaciones de forma de los árboles muestra	19
4.2 Relaciones entre DAP y edad de los árboles muestra	20
4.3 Participación de los componentes del árbol	21
4.4 Variaciones del contenido de humedad	22
4.5 Variaciones de la densidad básica de la madera	24
4.6 Contenido de carbono	28
4.7 Contenido de cenizas	31
4.8 Desarrollo de funciones alométricas para la especie Roble	32
4.8.1 Biomasa aérea	32
4.8.2 Funciones por componente	35
4.8.3 Funciones integradas con datos proyecto anterior	37
5 COMENTARIOS FINALES	39
6 REFERENCIAS	40



Fotografía gentileza de Pablo Novoa B

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 obliqua* (Roble), 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.

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 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.



Fotografía gentileza de Pablo Novoa B



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



Fotografía gentileza de Pablo Novoa B

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°25 de fecha 23/01/2012 para la generación de funciones alométricas en la determinación de existencias de carbono forestal de la especie *Nothofagus obliqua* (Roble). 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 Plataforma de Generación y Comercio de Bonos de Carbono del Sector Forestal de Chile (PBCCCh), la que contempla institucionalizar una serie de aspectos técnicos, entre los cuales está la determinación de niveles de referencia y monitoreo, los que poseen estrecha relación con 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.

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 DIGITAL¹ 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 marzo y mayo de 2012. Posteriormente se analizaron las muestras en laboratorio, entre los meses de marzo y septiembre (2012), debido a la gran cantidad y tamaño de las muestras procesadas.

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

¹ CAMPO DIGITAL, empresa de servicios múltiples, ha medido y pesado en campo más de 700 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 para la especie Roble tiene por objeto ser complementaria a estudios anteriores realizados en sitios de Malleco (Predio Jauja) y Osorno (Predio Boquial) y así ampliar la distribución geográfica (Gayoso *et al.* 2001). Por consiguiente, se incorporan 4 sitios localizados entre la VII y IX regiones: Parral (Predio Villa Baviera), Contulmo (Ex Reserva Contulmo CONAF), Lonquimay (Predio La Fusta) y Villarrica (Predio Flor del Lago), Cuadro 1.

2. Área de estudio y selección de la muestra

Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (ROBLE)

Cuadro 1 Caracterización sitios de muestreo especie Roble

Sitio	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud m s.n.m.	PP mm/año	Caracterización de los suelos
1	PARRAL (Predio Villa Baviera 36°23'03"	71°35'26"	400	800-1100	Andisol de textura franco limosa. Substrato conformado por toba volcánica cementada, clastos de granulometría diversa y con diferentes grados de meteorización.
2	CONTULMO (Nonguén 38° 01' 29"	73° 12' 40"	300	1900	Los suelos del sitio corresponden a la serie de suelo Nahuelbuta, que presenta roca metamórfica altamente micácea con drenaje moderado y moderada o fuerte erosión. En el perfil son suelos grisáceos a pardos oscuros de textura arcillo arenosa a arcilla masiva en profundidad. En sectores de mayor pendiente el suelo tiene menor espesor llegando en extremos a aflorar en superficie Fuente: IREN-CORFO (1964).
3	LONQUIMAY (Predio La Fusta) 38°34'28"	71° 26' 22"	1288-1376	1.500-2.500	Los suelos donde crece <i>Nothofagus obliqua</i> han sido desarrollados sobre rocas volcánicas andesíticas y basálticas cuaternarias cubiertas por cenizas volcánicas recientes (post glacial), pumicitas y escorias volcánicas. En general son suelos moderados a profundos (15-180 cm de profundidad) de textura media a fina y franco arcillo arenosa a arcillosa en profundidad, suelo de erodabilidad moderada a alta con drenaje rápido a moderado con pH ácido (3- 5.5) y bajo nivel nutricional.
4	VILLARRICA (Predio Flor del Lago) 39°09'35	72° 05' 55"	440 - 480	2.400	Suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, correspondiendo a suelos de transición entre los arcillosos y arenosos; moderadamente profundos, bien drenados, de colores pardos, de texturas medias; débil a moderadamente estructurados. Se caracterizan por su tercer estrato de textura moderadamente fino, débil a moderadamente estructurado, que descansa sobre un substratum de grava fina de basaltos escoriáceos vesiculares, sin problemas de enraizamiento.

2.2 Descripción general de la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (Roble)

Nothofagus obliqua es una especie monoica, caduca e intolerante, de corteza gruesa y agrietada en placas irregulares en ejemplares adultos. Presenta un tronco relativamente recto y cilíndrico, libre de ramas. En las poblaciones más abundantes del sur del país, puede alcanzar hasta los 40 m de altura y cerca de dos metros de diámetro, siendo las dimensiones más usuales 20 a 25 m de altura y 40 a 50 cm de diámetro (Donoso, 2006).

Distribución geográfica de la especie

La especie Roble es propia de los tipos forestales Roble-Hualo y Roble-Raulí-Coihue que en conjunto representan el 12,3% de la superficie de bosques en Chile (CONAF, 2011). También se asocia a los tipos forestales Ciprés de la Cordillera y Araucaria (Flora Chilena, 2013). Esta especie es endémica de los bosques subantárticos de Chile y Argentina. En Chile se distribuye entre las provincias de Colchagua y Llanquihue por la Cordillera de los Andes (30°30' a 41°S) y entre las provincias de Aconcagua y Osorno por la Cordillera de la Costa (33° a 40°S). En la Cordillera de Los Andes se ubica preferentemente entre los 1.000 y 2.000 m s.n.m. y en el Sur desde el nivel del mar hasta los 500 m s.n.m. Los tipos forestales Roble-Hualo y Roble-Raulí-Coihue concentran la mayoría de su superficie en la estructura renovales (Donoso, 2006).

Donoso *et al* (1993) determinaron que la especie tiene mayores crecimientos en su distribución Sur (entre pre-cordilleras de Cautín y Valdivia y Valles de la provincia de Osorno y Llanquihue) y menores crecimientos en poblaciones de altura de la cordillera de los Andes desde el paralelo 38 al Norte.

2.3 Selección de las unidades de estudio

La selección de los árboles de estudio consideró sitios representativos, lugares aptos de muestreo y el reconocimiento de terreno (CAMPO DIGITAL, 2012). La distribución de la muestra cubrió cinco rangos diamétricos y la selección individual estuvo dirigida a completar diámetros objetivos para asegurar la adecuada representación de la especie, sanos sin daños aparentes. Se seleccionaron 12 individuos en Villa Baviera, 11 en Contulmo, 10 en Lonquimay y 11 en Villarrica, Cuadro 2, a los cuales se midió el DAP² (Diámetro a la Altura de Pecho en centímetros), Altura Total (HT en metros) y se estimó su edad (años).

2 Aproximadamente a 1,3 m de altura.

2. Área de estudio y selección de la muestra

Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (ROBLE)

Cuadro 2 Atributos principales árboles muestra especie Roble

ÁRBOL	DAP (cm)	Altura Total (m)	Edad (años)	Sitio
50	42,0	17,3	75	LA FUSTA
51	46,0	20,5	71	LA FUSTA
52	34,0	15,0	67	LA FUSTA
53	10,1	6,9	29	LA FUSTA
54	17,4	17,5	58	LA FUSTA
55	26,9	16,8	58	LA FUSTA
56	15,0	12,0	43	LA FUSTA
57	32,7	19,5	69	LA FUSTA
58	43,0	19,0	47	LA FUSTA
59	21,3	10,7	50	LA FUSTA
150	66,0	36,8	82	FLOR DEL LAGO
151	38,9	35,5	54	FLOR DEL LAGO
153	58,0	39,3	78	FLOR DEL LAGO
154	28,8	26,3	56	FLOR DEL LAGO
155	24,2	26,9	48	FLOR DEL LAGO
156	17,4	22,6	48	FLOR DEL LAGO
158	61,5	41,3	74	FLOR DEL LAGO
160	22,2	23,7	61	FLOR DEL LAGO
162	38,8	27,0	42	VILLA BAVIERA
163	39,4	23,4	54	VILLA BAVIERA
164	22,3	20,1	55	VILLA BAVIERA
165	32,2	22,1	48	VILLA BAVIERA
167	22,3	23,7	51	VILLA BAVIERA
168	15,5	19,7	38	VILLA BAVIERA
169	16,5	22,1	49	VILLA BAVIERA
171	44,2	21,0	52	VILLA BAVIERA
173	49,5	22,2	64	VILLA BAVIERA
174	50,5	24,7	67	NONGUEN
176	64,5	24,8	72	NONGUEN
178	13,8	13,8	32	NONGUEN
179	50,0	24,7	76	NONGUEN
180	18,0	13,1	45	NONGUEN
181	27,6	19,4	57	NONGUEN
182	18,0	13,2	53	NONGUEN
183	11,2	14,0	29	NONGUEN
184	11,9	10,7	28	NONGUEN

DAP y HT medidos por CAMPO DIGITAL

3 METODOLOGÍA

3.1 Mediciones de terreno y obtención de muestras

En este estudio se aplicó el método de cosecha para la contabilidad de la biomasa de los individuos de las especies seleccionadas, logrando la medición directa del peso de las estructuras aéreas. El método utilizado está basado en el MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO 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”.

Los pesajes de terreno y toma de muestras los efectuó la empresa CAMPO DIGITAL, mientras todos 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 documento describe los procedimientos de análisis y entrega las funciones alométricas para biomasa aérea de la especie estudiada de acuerdo con los términos de referencia del proyecto desarrollado por la Corporación Nacional Forestal CONAF.

3.2 Procesamiento de las muestras en laboratorio

3.2.1 Determinación del contenido de humedad

a. De las muestras individuales.

Para la determinación del contenido de humedad base peso seco 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 el análisis de rodela a cuatro alturas (tocón, DAP, 50% de la altura total y copa) o en su defecto cuñas que incorporaron desde la médula a la corteza. De forma correspondiente también se determinó el contenido de humedad de la corteza para iguales cuatro alturas.

b. Del fuste completo.

Conscientes de la variabilidad del contenido de humedad a lo largo del fuste, lo que fue corroborado mediante análisis de varianza, se calculó la humedad del fuste ponderando cada segmento por su correspondiente contenido de humedad. Para ello se determinó el contenido de humedad promedio de cada segmento de volumen (tronco de cono), ponderando por la superficie de cada sección (ambas bases). La humedad promedio del fuste correspondió al promedio ponderado de las humedades por sus correspondientes volúmenes.

$$\begin{aligned} \text{CHF (V1F)} &= (\text{Área tocón} \cdot \text{Humedad tocón} + \text{Área DAP} \cdot \text{Humedad DAP}) / (\text{Área tocón} + \text{Área DAP}) \\ \text{CHF (V2F)} &= (\text{Área DAP} \cdot \text{Humedad DAP} + \text{Área 50\%H} \cdot \text{Humedad 50\%H}) / (\text{Área DAP} + \text{Área 50\%H}) \\ \text{CHF (V3F)} &= (\text{Área 50\%H} \cdot \text{Humedad 50\%H} + \text{Área Copa} \cdot \text{Humedad Copa}) / (\text{Área 50\%H} + \text{Área Copa}) \\ \text{CHF (ÁRBOL)} &= (\text{V1F} \cdot \text{CHF (V1F)} + \text{V2F} \cdot \text{CHF (V2F)} + \text{V3F} \cdot \text{CHF (V3F)}) / (\text{V1F} + \text{V2F} + \text{V3F}) \end{aligned}$$

Dónde:

V1F, V2F y V3F son los correspondientes volúmenes fustales de los tres segmentos.

CHF= contenido humedad promedio fuste

c. De la corteza del fuste completo.

De la misma forma que el fuste, se determinó la humedad promedio de cada segmento ponderando por la sección correspondiente de corteza, calculada como la diferencia de las secciones con y sin corteza. Luego este contenido de humedad se ponderó por los correspondientes volúmenes para obtener la humedad promedio de la corteza por árbol. Para esta determinación se midió los diámetros y espesores, con precisión a 0,5 milímetros, en ocho radiales para las cuatro posiciones de altura (tocón, DAP, 50% de altura y copa).

$$\begin{aligned} \text{CHC (V1C)} &= ((\text{Área tocón con corteza} - \text{Área tocón sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza tocón} + (\text{Área DAP con corteza} - \text{Área DAP sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza DAP}) / ((\text{Área tocón con corteza} - \text{Área tocón sin corteza}) + (\text{Área DAP con corteza} - \text{Área DAP sin corteza})) \\ \text{CHC (V2C)} &= ((\text{Área DAP con corteza} - \text{Área DAP sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza DAP} + (\text{Área 50\%H con corteza} - \text{Área 50\%H sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza 50\%H}) / ((\text{Área DAP con corteza} - \text{Área DAP sin corteza}) + (\text{Área 50\%H con corteza} - \text{Área 50\%H sin corteza})) \\ \text{CHC (V3C)} &= ((\text{Área 50\%H con corteza} - \text{Área 50\%H sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza 50\%H} + (\text{Área Copa con corteza} - \text{Área Copa sin corteza}) \cdot \text{Humedad corteza Copa}) / ((\text{Área 50\%H con corteza} - \text{Área 50\%H sin corteza}) + (\text{Área Copa con corteza} - \text{Área Copa sin corteza})) \\ \text{CHC (ÁRBOL)} &= (\text{V1C} \cdot \text{CHC (V1C)} + \text{V2C} \cdot \text{CHC (V2C)} + \text{V3C} \cdot \text{CHC (V3C)}) / (\text{V1C} + \text{V2C} + \text{V3C}) \end{aligned}$$

Dónde:

V1C, V2C, V3C son los correspondientes volúmenes de corteza de los tres segmentos.

CHC= contenido humedad promedio de la corteza del árbol.

3. Metodología

d. De las ramas y hojas

Para los restantes componentes se determinó el contenido de humedad por el promedio simple de dos o tres repeticiones por árbol.

3.2.2 Determinación de la densidad básica de la madera

a. 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. Con relación a las densidades básicas de la madera del fuste sin corteza, éstas se determinaron sobre probetas en forma de cuña que comprenden desde el duramen hasta la albura. Según el tamaño se dividieron en dos o tres partes, para obtener datos de madera centro y borde.

b. Del fuste completo.

Para incorporar la variación de la densidad básica según su posición a diferentes alturas del árbol, se siguió un procedimiento similar al anotado para la determinación de la humedad promedio. Es decir, se obtuvo una densidad promedio del fuste ponderando por sus respectivas secciones.

$$\begin{aligned} \text{DBF (V1F)} &= (\text{Área tocón} \cdot \text{DB tocón} + \text{Área DAP} \cdot \text{DB DAP}) / (\text{Área tocón} + \text{Área DAP}) \\ \text{DBF (V2F)} &= (\text{Área DAP} \cdot \text{DB DAP} + \text{Área 50\%H} \cdot \text{DB 50\%H}) / (\text{Área DAP} + \text{Área 50\%H}) \\ \text{DBF (V3F)} &= (\text{Área 50\%H} \cdot \text{DB 50\%H} + \text{Área Copa} \cdot \text{DB Copa}) / (\text{Área 50\%H} + \text{Área Copa}) \\ \text{DBF (ÁRBOL)} &= (\text{V1F} \cdot \text{DBF (V1F)} + \text{V2F} \cdot \text{DBF (V2F)} + \text{V3F} \cdot \text{DBF (V3F)}) / (\text{V1F} + \text{V2F} + \text{V3F}) \end{aligned}$$

Dónde:

V1F, V2F y V3F son los correspondientes volúmenes fustales de los tres segmentos:

$$\text{(V1F)} = (\text{L1/3}) \cdot (\text{Área tocón} + \text{Área DAP} + (\text{Área tocón} \cdot \text{Área DAP})^{0.5})$$

$$\text{L ()} = \text{Longitud del segmento de fuste}$$

$$\text{DBF ()} = \text{densidad básica promedio fuste}$$

c. De la corteza del fuste completo.

Se siguió un procedimiento similar a la determinación de la humedad promedio, es decir ponderando por sus respectivas secciones. Para esta determinación se midió la corteza con precisión a 0,5mm en ocho radiales por sección.

$$\begin{aligned} \text{DBHC (V1C)} &= ((\text{Área tocón con corteza}-\text{Área tocón sin corteza}) * \text{DB corteza tocón} + (\text{Área DAP con} \\ &\quad \text{corteza}-\text{Área DAP sin corteza}) * \text{DB corteza DAP}) / ((\text{Área tocón con corteza}-\text{Área tocón sin} \\ &\quad \text{corteza}) + (\text{Área DAP con corteza}-\text{Área DAP sin corteza})) \\ \text{DBC (V2C)} &= ((\text{Área tocón con corteza}-\text{Área tocón sin corteza}) * \text{DB corteza tocón} + (\text{Área DAP con} \\ &\quad \text{corteza}-\text{Área DAP sin corteza}) * \text{DB corteza DAP}) / ((\text{Área tocón con corteza}-\text{Área tocón sin} \\ &\quad \text{corteza}) + (\text{Área DAP con corteza}-\text{Área DAP sin corteza})) \\ \text{DBC (V3C)} &= ((\text{Área 50\%H con corteza}-\text{Área 50\%H sin corteza}) * \text{DB corteza 50\%H} + (\text{Área Copa con} \\ &\quad \text{corteza}-\text{Área Copa sin corteza}) * \text{DB corteza Copa}) / ((\text{Área 50\%H con corteza}-\text{Área 50\%H sin} \\ &\quad \text{corteza}) + (\text{Área Copa con corteza}-\text{Área Copa sin corteza})) \\ \text{DBC (ÁRBOL)} &= (\text{V1C} * \text{DBC (V1C)} + \text{V2C} * \text{DBC (V2C)} + \text{V3C} * \text{DBC (V3C)}) / (\text{V1C} + \text{V2C} + \text{V3C}) \end{aligned}$$

Dónde:

V1C, V2C, V3C son los correspondientes volúmenes de corteza de los tres segmentos.

DBC= densidad básica promedio de la corteza del árbol

d. De las ramas

Para las ramas se determinó la densidad básica por el promedio simple de dos o tres repeticiones por árbol.

3.2.3 Separación de ramillas y hojas

La proporción de los componentes ramas menores y hojas, se determinó mediante separación de las ramas y hojas de muestras secas.

3.2.4 Determinación del contenido de carbono

Para la determinación del contenido de carbono en la biomasa se utilizó el método gravimétrico. Muestras de 2 gramos de biomasa seca triturada se someten 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). No se empleó el convencional factor de Bemmelen (1891) de 1,724, que ha sido ampliamente usado desde que fuera presentado por su autor, ya que muchos estudios empíricos posteriores muestran la gran variabilidad del mismo ³, lo que sugiere cierta relación

³ Entre 1,91 y 5,08 en suelos de Brasil (Bianchi *et al.* 2008); entre 1,71 y 2,19 para residuos orgánicos incluyendo residuos de plantas (Navarro *et al.* 1993); entre 1,55 y 2,21 para diferentes tipos de residuos orgánicos municipales y compost (Iglesias y Pérez 1992); entre 1,51 y 2,60 para desechos orgánicos, estiércol y compost (Larney *et al.* 2005); lo que sugiere cierta relación con el tipo y composición de la materia orgánica (Perié y Ouimet 2007). Otra revisión crítica de este factor MO/CC encontró un rango de variación entre 1,4 y 2,25 con un valor medio de 1,9 para estudios empíricos publicados y 2,0 para consideraciones más teóricas (Prybil 2010).

3. Metodología

con el tipo y composición de la materia orgánica (Perié y Ouimet 2007). En general se estima que el factor Bemmelen es demasiado bajo para la mayoría de las situaciones y podría sobre estimar el contenido de carbono en tejidos vegetales. Larney *et al.* (2005), obtuvieron un factor de 1,917 mediante correlación, basado en el análisis de 3.050 muestras de materia orgánica en diferentes estados de descomposición.

Las determinaciones de este estudio comprendieron una selección representativa que incluye todos los componentes del árbol y posición en el fuste.

3.2.5 Determinación de la edad de los árboles

Se utilizó el método convencional de conteo de anillos con empleo de estéreo microscopio Olympus Modelo SZ51.

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 del 95%, entre biomasa aérea (BA) y una o dos variables independientes (DAP y altura total). Se probaron 24 modelos simples, polinómicos y transformaciones Box Cox de un factor y no lineales para dos factores, Cuadro 3. 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 98% que indica el porcentaje de la variabilidad que es explicada por el modelo; y, correlaciones sobre 0,99 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 cuadrático medio (RECM).

Cuadro 3. 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

Se presentan una serie de análisis previos y complementarios al estudio de funciones de biomasa propiamente tal con la finalidad de facilitar la comprensión del proceso de validación de la base de datos y sus resultados. En esta fase se presentan los resultados de los datos de este estudio sin integrar datos de estudios anteriores.

4.1 Relaciones de forma de los árboles muestra

La figura 1 presenta la distribución de tamaños de árbol incluidos en el estudio de funciones, además de la relación entre DAP y altura total del fuste, Cuadro 4.

Cuadro 4 Análisis de varianza, regresión altura total fuste versus DAP, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,0109	1	0,0109	43,55	0,0000
Residuo	0,0085	34	0,0003		
Total (Corregido)	0,0194	35			
Estadísticos del modelo					
Coefficiente correlación		0,7494	Durbin-Watson	1,2578	0,0085
R-cuadrada		56,1573	Auto correlación de residuos		0,3521
Error estándar del estimador		0,0158			
Error medio absoluto		0,0123			

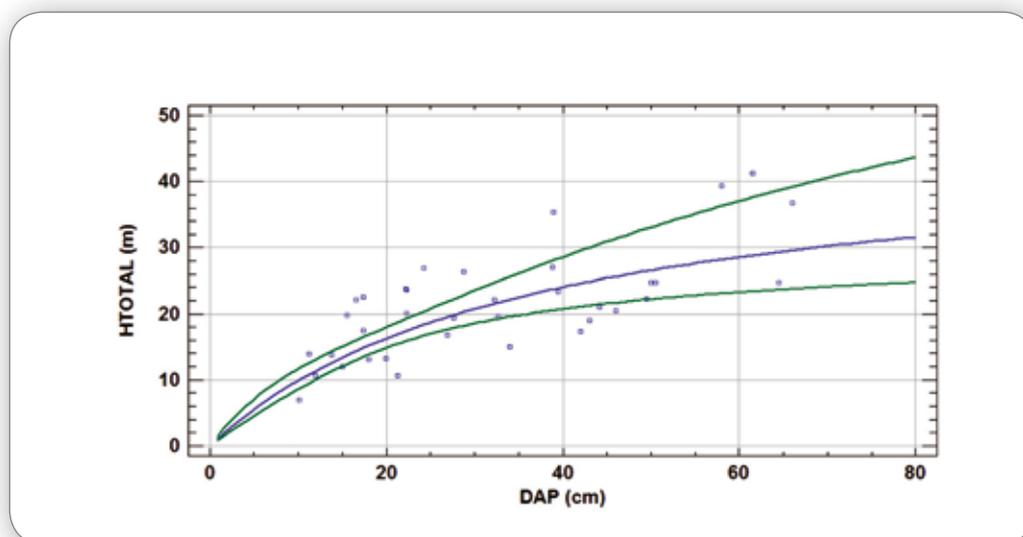


Figura 1.
Relaciones de forma, Roble. Función: $HTOTAL = 1 / (0,0217326 + 0,794063 / DAP)$

4.2 Relaciones entre DAP y edad de los árboles muestra

Como una aproximación se puede estimar la edad de los individuos a partir de la medición del DAP, Figura 2. Sin embargo se aprecia diferencia entre sitios, el sitio La Fusta aparece más restrictivo en comparación con el sitio Flor del Lago, Figura 3.

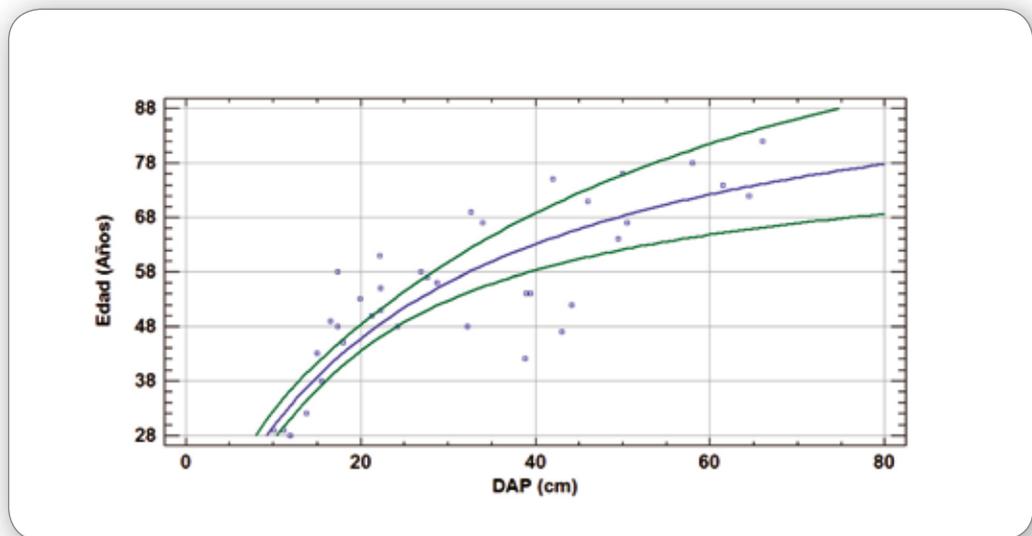


Figura 2.

Estimación de la edad a partir del DAP, Roble. Coeficiente de Correlación = 0,8661; R-cuadrada = 75,03 por ciento; Error estándar del estimador = 0,0031; Error absoluto medio = 0,0024; Estadístico Durbin-Watson = 2,1856 (P=0,6997); Auto-correlación de residuos en retraso 1 = -0,1490. Función: $Edad = 1/(0,00984776 + 0,240063/DAP)$

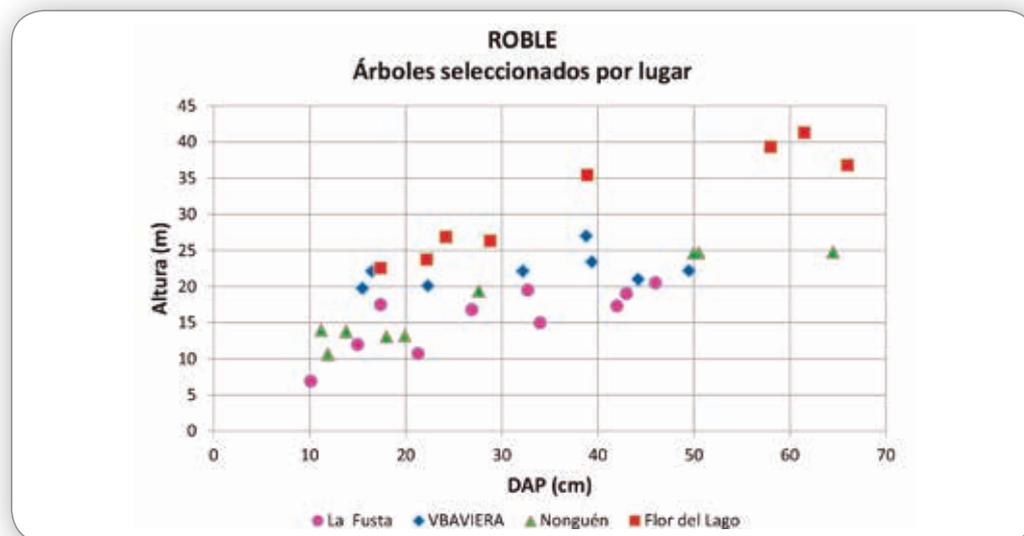


Figura 3.
Relaciones DAP altura total para los diferentes sitios, Roble

4.3 Participación de los componentes del árbol

Se determinó la participación de cada componente en base peso seco, resultando el fuste sin corteza 75% del peso de la biomasa aérea, Cuadro 5, Figura 4. La participación de hojas es baja debido a la época de muestreo a inicios del otoño, una parte de los árboles había perdido todo su follaje.

Cuadro 5 Porcentaje promedio por componente con intervalos de confianza del 95%, Roble.

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar
CORTEZA	36	6,15	2,3365	0,3894
FUSTE	36	75,53	7,6744	1,2791
HOJA	36	2,25	2,9297	0,4883
RAMA	36	16,07	7,3909	1,2318

4. Resultados

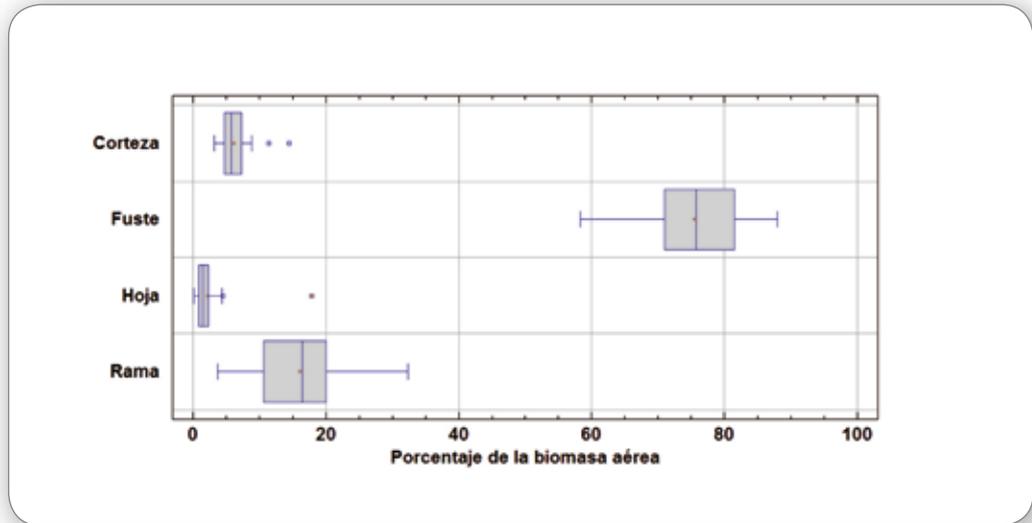


Figura 4.
Variabilidad en la participación de los componentes del árbol, Roble.

Coefficiente de expansión de biomasa. El coeficiente de expansión de biomasa (BEF) que permite estimar la biomasa total aérea del árbol a partir del peso del fuste sin corteza, varió entre 1,14 y 1,72 con un valor promedio de 1,34.

4.4 Variaciones del contenido de humedad

El contenido de humedad (estado verde) para los distintos componentes del árbol varía ampliamente entre 35,87 y 220,8% y presenta diferencias significativas entre componentes al 95% de confianza, Cuadro 6 y 7, Figura 5. La transformación del peso verde a peso seco tomó en cuenta estas diferencias.

Cuadro 6 Análisis de varianza para contenido de humedad (%) por componente, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	326361	4	81590,2	295,58	0.0000
Intra grupos	183836	666	276,03		
Total (Corregido)	510197	670			

Cuadro 7 Medias para contenido de humedad (%) por componente, Roble

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
Corteza	281	80,44	12,83	0,77	A
Fuste	218	98,21	18,77	1,27	B
Hoja	59	160,16	27,89	3,63	D
Rama	72	107,73	11,16	1,31	C
Total	671	97,89	27,60	1,07	

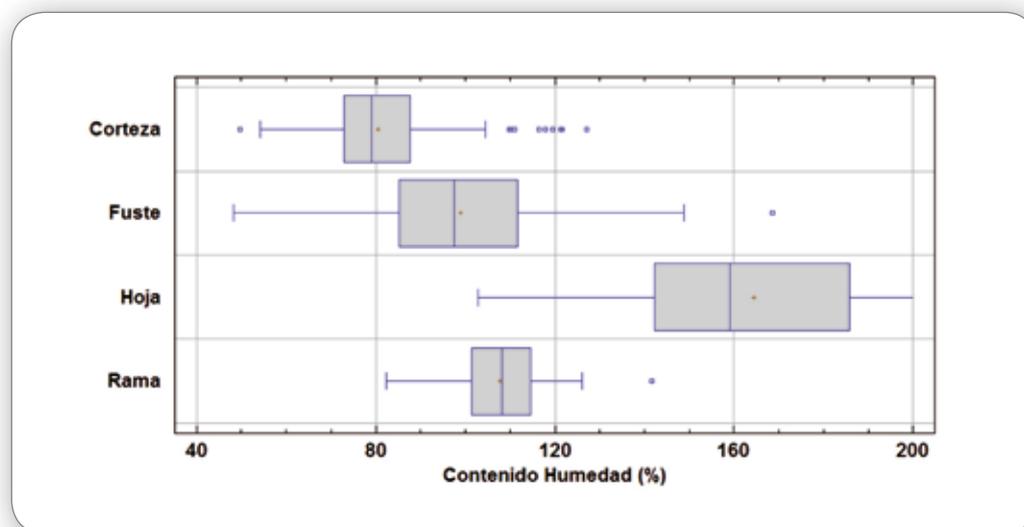


Figura 5.
Variabilidad del contenido de humedad (%) por componente, Roble.

Igualmente se determinó la variabilidad de la humedad en el fuste según posición en altura del árbol. El ANOVA correspondiente muestra diferencias significativas entre la media de contenido de humedad entre algunos niveles de posición y otro, razón por la cual el cálculo de la humedad promedio del fuste se determinó como el promedio ponderado a los volúmenes de tres secciones: sección 1 (Tocón-DAP), sección 2 (DAP-P50%H) y sección 3 (P50%H-COPA), Cuadro 8. Se estima, sin embargo, que podría ser utilizado el promedio general.

Cuadro 8 ANOVA para contenido de humedad (%) del fuste por posición, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4084,2	3	1361,41	4,03	0,0082
Intra grupos	72358,6	214	338,12		
Total (Corregido)	76442,8	217			

Aunque las diferencias no son claras, la humedad tiende a aumentar hacia la parte alta de los árboles, Cuadro 9, Figura 6.

4. Resultados

Cuadro 9 Medias para contenido de humedad (%) del fuste por posición, Roble

Posición	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos
COPA	55	102,6270	21,3867	2,8838	B
P 50% H	53	101,3720	17,5424	2,4096	B
DAP	48	97,8085	15,5509	2,2446	AB
TOCÓN	62	91,8935	18,2385	2,3163	A
Promedio	218	98,2083	18,7689	1,2712	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

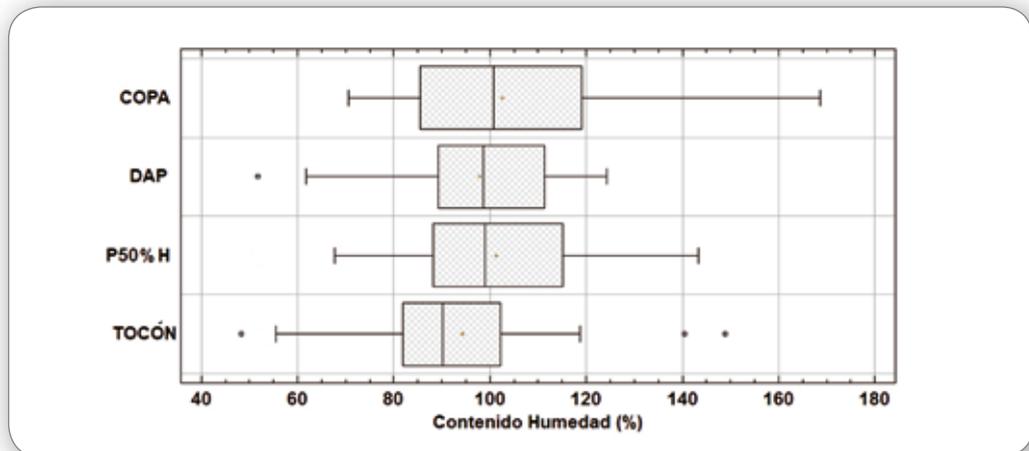


Figura 6.
Variabilidad del contenido de humedad (%) del fuste por posición, Roble

4.5 Variaciones de la densidad básica

Se determinó la densidad básica de cada árbol y analizó las diferencias significativas entre componentes del árbol y diferentes posiciones en el fuste. Se consideraron cuatro alturas y mediciones de densidad en maderas de albura y duramen. El ANOVA determinó diferencias significativas como se aprecia en el resultado del análisis y prueba de rangos múltiples, Cuadros 10 y 11, Figura 7. La corteza presenta mayor densidad que el fuste y las ramas presentaron el menor valor.

Cuadro 10 Medias para densidad básica (Mg/m^3) por componente con intervalos de confianza del 95,0%, Roble

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos
Corteza	144	0,5427	0,0477	0,0039	B
Fuste	155	0,4972	0,0607	0,0049	A
RAMA	36	0,4898	0,0294	0,0049	A
Total	335	0,5159	0,0575	0,0031	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

Cuadro 11 ANOVA para densidad básica (Mg/m^3) por componente, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,18238	2	0,0911	32,78	0,0000
Intra grupos	0,9236	332	0,0028		
Total (Corregido)	1,1059	334			

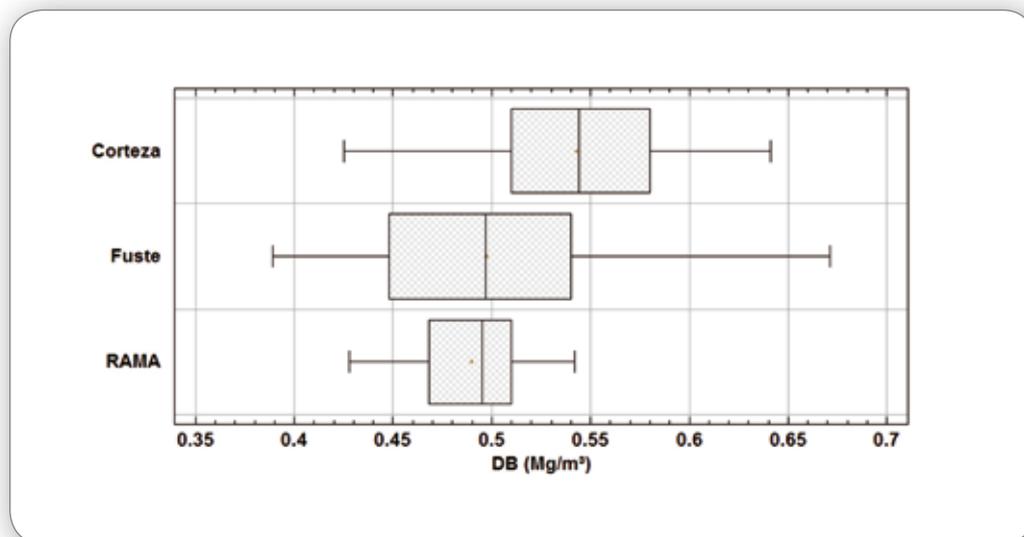


Figura 7.
Variabilidad densidad básica (Mg/m^3) por componentes, Roble

Aun cuando la densidad básica presenta una dispersión moderada, se analizó la variabilidad según la posición (altura) en el árbol, determinándose diferencias significativas desde el tocón hasta la copa, Cuadro 12 y 13, Figura 8. La densidad varía disminuyendo a medida que sube en el árbol.

4. Resultados

Cuadro 12 ANOVA para densidad básica (Mg/m³) por posición, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,2650	3	0,0883	43,98	0,0000
Intra grupos	0,3033	151	0,0020		
Total (Corregido)	0,5684	154			

Cuadro 13 Resumen estadístico para densidad básica (Mg/m³), Roble

Posición	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
Tocón	42	0,5458	0,0446	0,0069	C
DAP	41	0,5234	0,0522	0,0081	B
P50%H	36	0,4599	0,0419	0,0069	A
Copa	36	0,4479	0,0381	0,0063	A
Total	55	0,4972	0,0607	0,0048	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

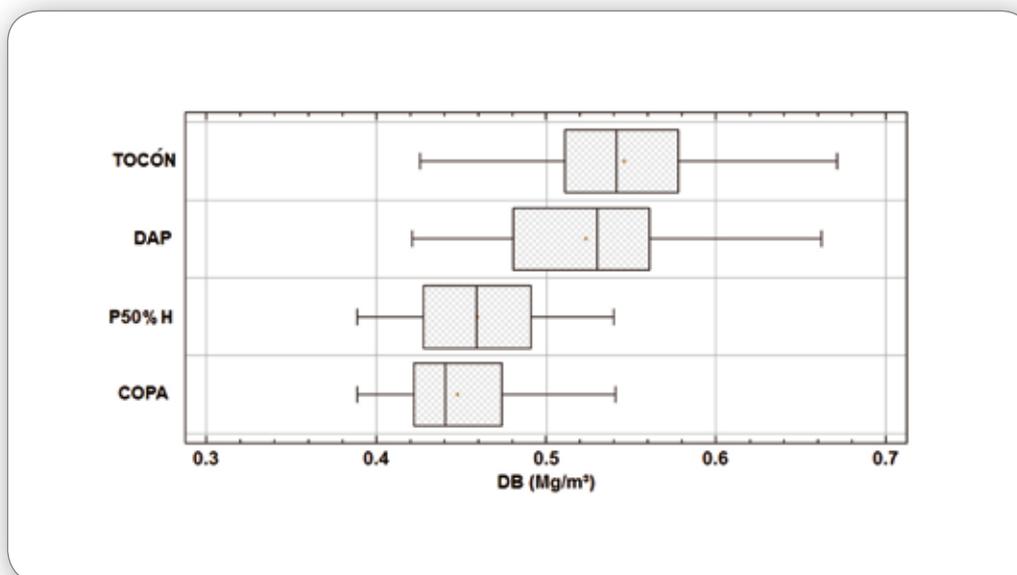


Figura 8.
Variabilidad densidad básica (Mg/m³) según posición en el fuste, Roble

En 11 árboles se obtuvo sub muestras de densidad básica para determinar diferencias entre madera de la sección exterior (A) y sección interior (B), en los árboles de mayor diámetro, Cuadro 14 y 15. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de DB entre un nivel de condición y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Las secciones se identifican desde afuera hacia adentro por las letras A y B. Sin embargo este resultado puede estar afectado por un cierto nivel de pudrición en el sector de la médula.

Cuadro 14 ANOVA para densidad básica (Mg/m³) por condición, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0015	1	0,0015	0,75	0,3973
Intra grupos	0,0398	20	0,0019		
Total (Corregido)	0,0412	21			

Cuadro 15 Resumen estadístico para densidad básica (Mg/m³), por condición, Roble

Condición	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
A	11	0,5780	0,0240	0,0072	A
B	11	0,5616	0,0583	0,0175	A
Total	22	0,5698	0,0443	0,0095	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

Considerando que las muestras provienen de diferentes sitios, se realizó el contraste de medias entre ellos. El ANOVA determina la ausencia de diferencias significativas en la densidad básica entre sitios, Cuadro 16 y 17, Figura 9.

Cuadro 16 ANOVA para densidad básica (Mg/m³) por sitio

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0070	3	0,0023	0,71	0,5488
Intra grupos	1,0989	331	0,0033		
Total (Corregido)	1,1059	334			

Cuadro 17 Resumen estadístico para densidad básica (Mg/m³), por lugar, Roble

Lugar	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
Flor del Lago	74	0,5163	0,0634	0,0074	A
La Fusta	90	0,5100	0,0456	0,0048	A
Nonguén	87	0,5225	0,0595	0,0063	A
V. Baviera	84	0,5151	0,0615	0,0067	A
Total	335	0,5159	0,0575	0,0031	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

4. Resultados

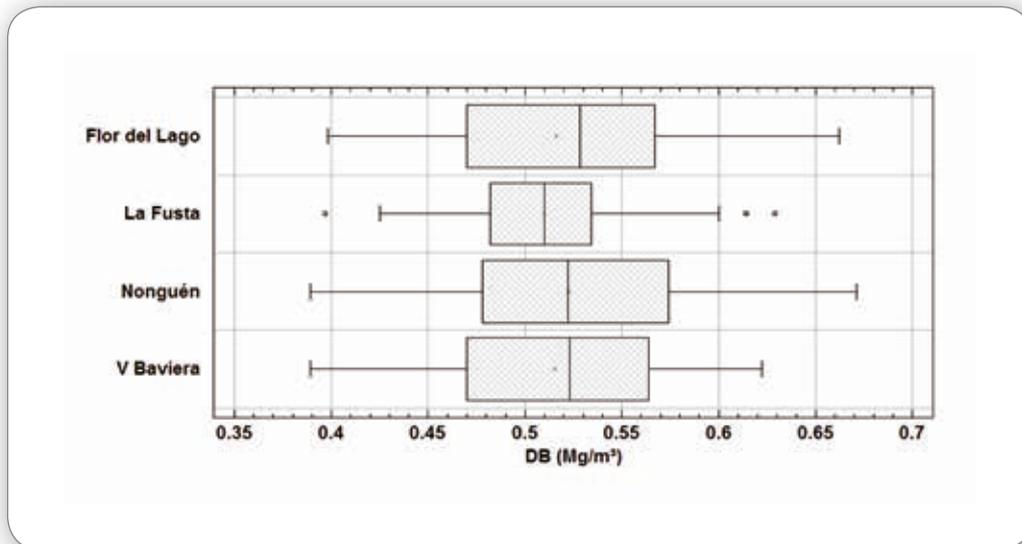


Figura 9.
Variabilidad densidad básica (Mg/m^3) según lugar, Roble.

4.6 Contenido de carbono

Los resultados muestran diferencias significativas en el contenido de carbono de los componentes del árbol. Este se expresa como fracción de la biomasa, sin dimensión (kg/kg) o bien en porcentaje. El mayor contenido aparece asociado a la madera de fuste y el menor a la corteza, Cuadro 18 y 19, Figura 10.

Cuadro 18 ANOVA para contenido de carbono por componente, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0815	3	0,0272	235,82	0,0000
Intra grupos	0,0263	228	0,0001		
Total (Corregido)	0,1078	231			

Cuadro 19 Resumen estadístico para contenido de carbono por componente, especie Roble

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
Corteza	76	0,4758	0,0170	0,0019	A
Fuste	112	0,5173	0,0031	0,0003	D
Hoja	28	0,4886	0,0097	0,0018	B
Rama	16	0,502	0,0074	0,0018	C
Total	232	0,4992	0,0216	0,0014	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

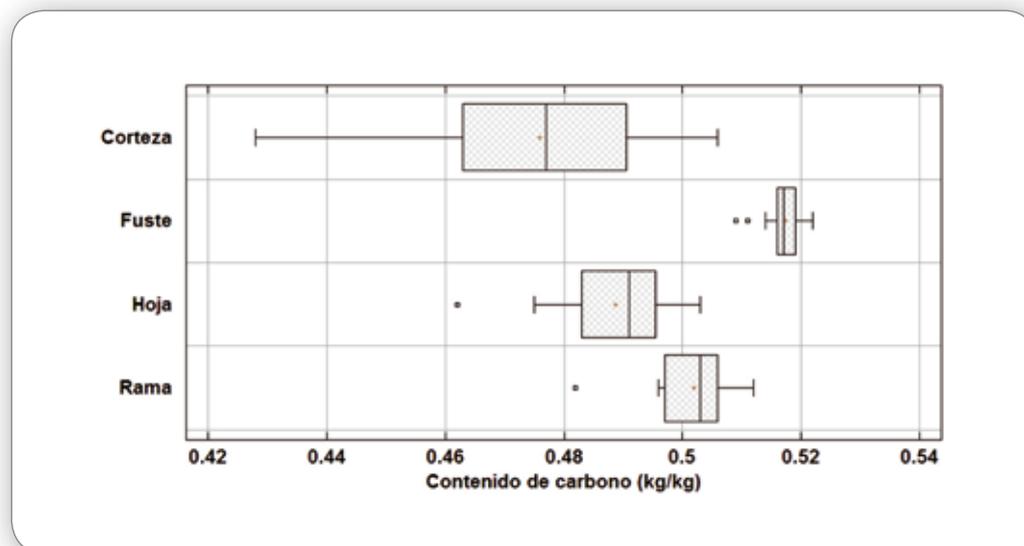


Figura 10.
Variabilidad contenido de carbono por componente, Roble

El contenido en el fuste no presenta mayor variabilidad. El ANOVA correspondiente confirma la no existencia de diferencias significativas por posición a diferentes alturas en el árbol, Cuadro 20 y 21, Figura 11.

Cuadro 20 ANOVA para contenido de carbono por posición en el fuste, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0000056	3	0,00000186	0,19	0,9044
Intra grupos	0,001072	108	0,00000992		
Total (Corregido)	0,00107	111			

Cuadro 21 Resumen estadístico para contenido de carbono del fuste por posición, Roble

Posición	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
COPA	40	0,5172	0,0034	0,00054	A
DAP	28	0,5171	0,0028	0,00054	A
P50HT	16	0,5173	0,0031	0,00078	A
TOCON	28	0,5177	0,0029	0,00056	A
Total	112	0,5173	0,0031	0,00029	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

4. Resultados

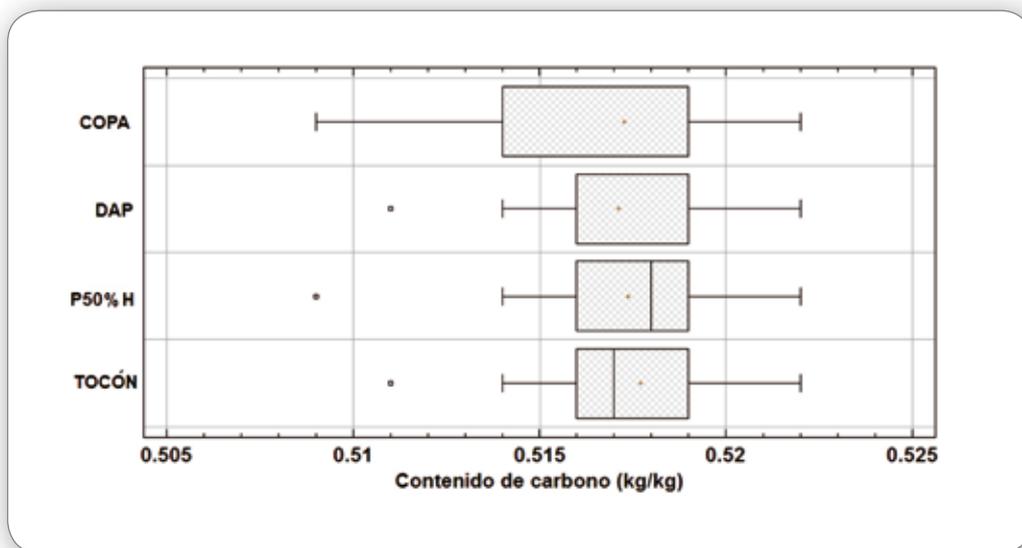


Figura 11.
Variabilidad contenido de carbono por posición en el fuste, Roble

La mayor variabilidad la presenta el contenido de carbono en la corteza, el que aumenta con la posición en altura del árbol, Cuadro 22, Figura 12.

Cuadro 22 Resumen estadístico para contenido de carbono de la corteza por posición, Roble

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos (*)
COPA	16	0,4948	0,0067	0,0017	B
DAP	28	0,4664	0,0134	0,0025	A
P50HT	16	0,4868	0,0085	0,00214	B
TOCON	16	0,4625	0,0117	0,0029	A
Total	76	0,4758	0,0170	0,0019	

(*) A igual letra no existen diferencias significativas

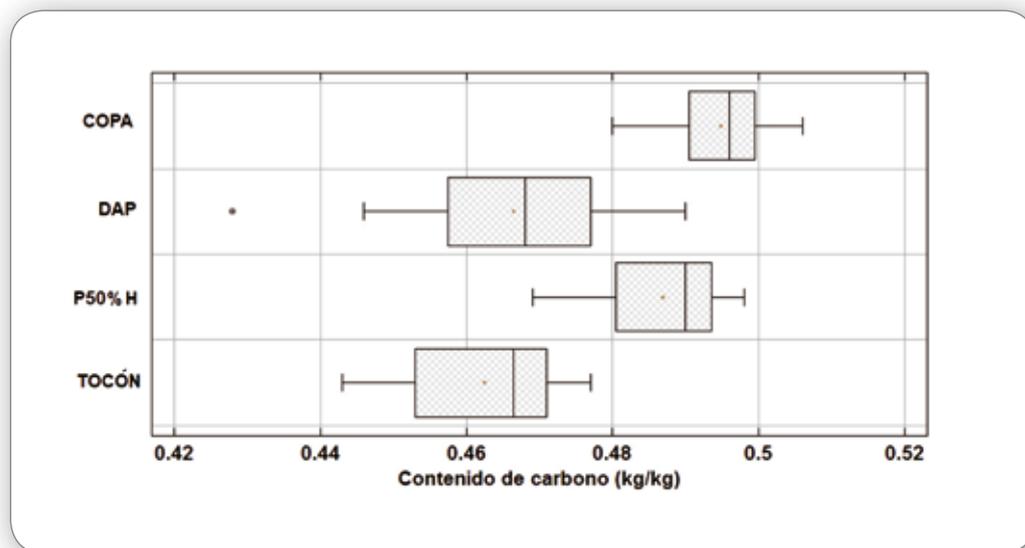


Figura 12.
Variabilidad contenido de carbono de la corteza por posición en el árbol, Roble

4.7 Contenido de cenizas

El contenido de cenizas de los componentes del árbol para la especie Roble se aprecian en el Cuadro 23, Figura 13. El ANOVA muestra diferencias significativas de la media de contenido de cenizas entre los distintos componentes, Cuadro 24.

Cuadro 23 Resumen estadístico para contenido de cenizas por componente, Roble

Componente	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Error Estándar	Grupos Homogéneos
Corteza	76	8,7736	3,2642	0,3744	D
Fuste	112	0,8184	0,5793	0,0547	A
Hoja	28	6,3260	1,8985	0,3587	C
Rama	16	3,7550	1,4001	0,3500	B
Total	232	4,2917	4,1411	0,2718	

Cuadro 24 ANOVA para contenido de carbono por posición en el fuste, Roble

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2998,28	3	999,425	236,59	0,0000
Intra grupos	963,128	228	4,22425		
Total Corregido)	3961,40	231			

4. Resultados

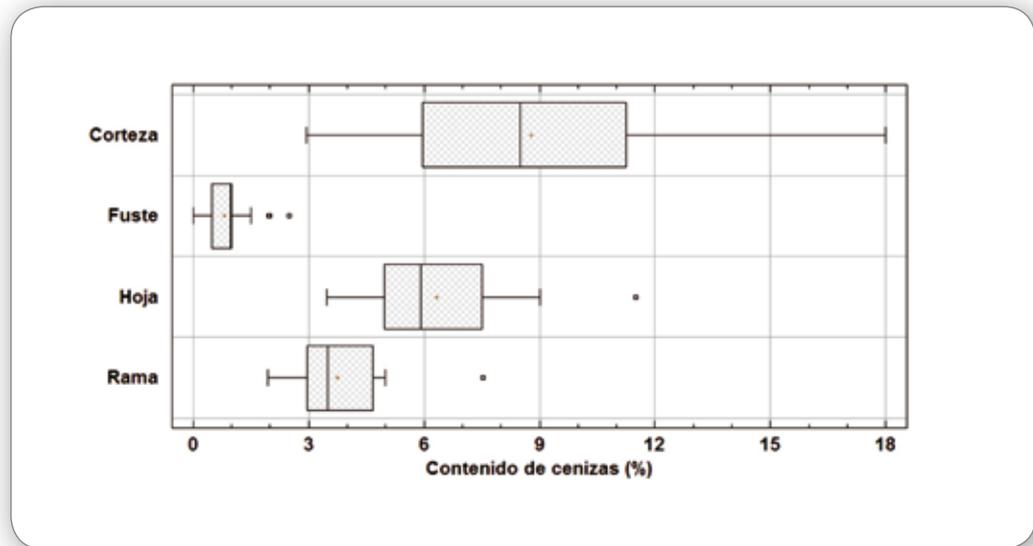


Figura 13.
Variabilidad contenido de cenizas por componente, Roble

4.8 Desarrollo de funciones alométricas para la especie Roble

4.8.1 Biomasa aérea

Los principales modelos seleccionados corresponden a modelos multiplicativos y otros no lineales, Cuadro 25. La biomasa aérea en peso seco se identifica como BA, el diámetro a la altura del pecho con corteza como DAP y la altura total del fuste como HT. Los errores de los modelos son válidos para el rango de DAP comprendido entre 10 y 66cm.

Cuadro 25 Modelos seleccionados para biomasa aérea (BA)

Tipo	Forma	Variable independiente	Variables dependientes
Multiplicativo	$Y = a \cdot X^b$	BA (kg)	DAP (cm)
No lineal	$Y = d + \exp(a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2)$	BA (kg)	DAP (cm), HT (m)
Transformaciones Box	BOX COX $(Y) = a + b \cdot X$	BA (kg)	DAP (cm)
Cox	BOX COX $(Y) = 1 + (Y^c - 1) / (c \cdot d^f)$		

Los siguientes cuadros resumen los estadísticos de los diversos modelos ajustados seleccionados, en especial los términos de error, Cuadros 26 a 28 y Figuras 14 y 15. El modelo con menor error (25,21%) corresponde a un modelo no lineal con el DAP y la altura total como variables independientes, Modelo 1, Cuadro 26.

Cuadro 26 Coeficientes de regresión modelo BA con dos variables independientes (Modelo 1)

Especie	Roble	DAP mínimo = 10 cm		DAP máximo = 66 cm	
		Estimado	Error Estándar	Intervalo confianza a 95%	
				Asintótico Inferior	Asintótico Superior
d	-202,182	130,698	-468,405	64,041	d = 0,1
a	4,7384	0,4012	3,9211	5,5557	a = 0,1
b	0,0344	0,0049	0,0244	0,0444	b = 0,1
c	0,0314	0,0044	0,0223	0,0404	c = 0,1
Modelo	BA (kg) = -202,182+exp(4,7384+0,0344919*DAP+0,0314178*HT)				
Estadígrafos	R-Cuadrada = 95,65%; Error estándar del estimador = 191,166 Error medio absoluto = 118,226; Estadístico Durbin-Watson = 1,7552 REMC= 25,21%; DIFA= 0,005				

Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio
Modelo	4,41201E7	4	1,103E7
Residuo	1,16942E6	32	36544,5
Total	4,52895E7	36	
Total (Corregido)	2,68911E7	35	

Cuadro 27 Coeficientes de regresión modelo BA multiplicativo (Modelo 2)

Especie	Roble	DAP mínimo = 10,0 cm		DAP máximo = 66 cm	
		Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico	
				T	Valor-P
Intercepto	-2,1078	0,2592	-8,1301	0,0000	Intercepto= ln(a)
Pendiente	2,3896	0,0767	31,1208	0,0000	
Modelo	BA (kg) = exp (-2,10779 + 2,3896*ln(DAP))				Y = a*X ^b
Estadígrafos	Coeficiente de Correlación = 0,9828; R-cuadrada = 96,61% Error estándar del estimador = 0,2422; Error absoluto medio = 0,1996; Estadístico Durbin-Watson = 1,2466 (P=0,0077) REMC= 47,77; DIFA= 4,33				

Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	56,855	1	56,855	968,51	0,0000
Residuo	1,9959	34	0,0587038		
Total (Corregido)	58,8509	35			

4. Resultados

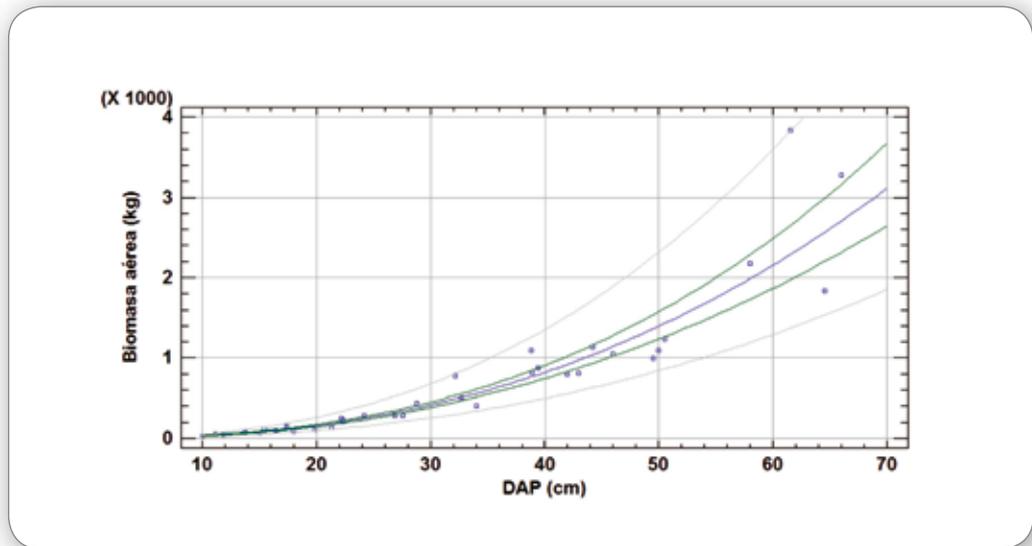


Figura 14.
Modelo 2 multiplicativo para Biomasa Aérea en función del DAP, Roble.
Función: $PSAEREO = \exp(-2,10779 + 2,3896 \cdot \ln(DAP))$

Cuadro 28 Coeficientes de regresión modelo BA Box Cox (Modelo 3)

Especie	Roble	DAP mínimo = 10,0 cm		DAP máximo = 66 cm	
Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P	
Intercepto	250,068	39,8426	6,2764	0,0000	
Pendiente	28,2868	1,1129	25,4178	0,0000	
Modelo	Box Cox(BA) = 250,068 + 28,2868 * DAP donde $(BA^{0,249} - 1)$ Box Cox(BA) = $1 + \frac{250,068 + 28,2868 * DAP}{(0,249 * 351,428^{-0,751})}$			Potencia = 0,249 Cambio = 0,0	
Estadígrafos	Coeficiente de Correlación = 0,9746; R-cuadrada = 95,0% Error estándar del estimador = 106,644 REMC = 44,54%; DIFA = 1,38%				
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	7,34758E6	1	7,34758E6	646,06	0,0000
Residuo	386677,0	34	11372,9		
Total (Corregido)	7,73426E6	35			

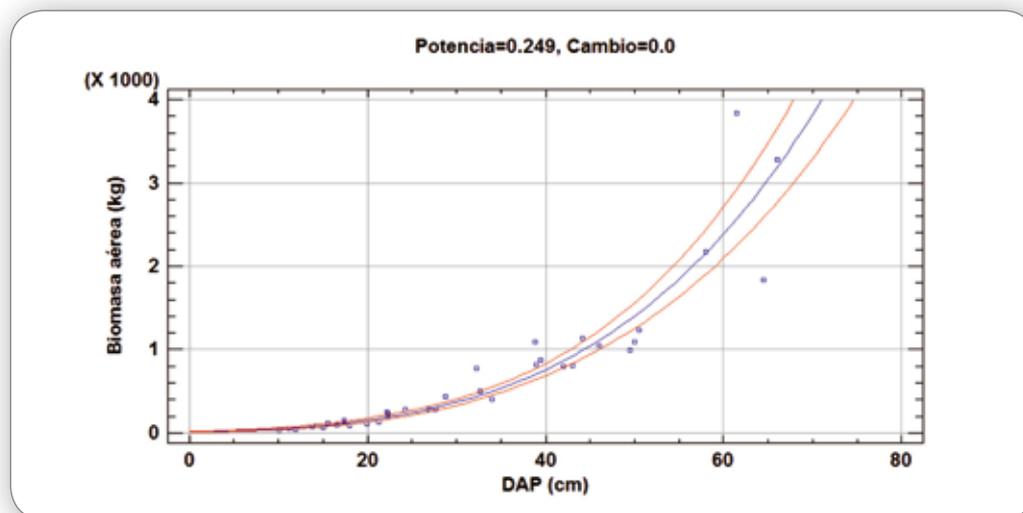


Figura 15.
Modelo 3 Box Cox, Biomasa Aérea=expresada en unidad de peso (kg) en función del DAP (cm), Roble

4.8.2 Funciones por componente

Los modelos comprenden solamente ramas y corteza en función del DAP en centímetros y la altura total (HT) en metros, Cuadros 29 y 30, Figura 16. Como se advierte anteriormente (Capítulo 4.3), no se incluye el follaje debido a que en la época de muestreo los árboles habían perdido mayoritariamente sus hojas.

Cuadro 29 Coeficientes de regresión modelo RAMAS con dos variables independientes (Modelo 4)

Especie	Roble	DAP mínimo = 10,0 cm		DAP máximo = 66 cm	
		Estimado	Error Estándar	Intervalo confianza a 95%	
Parámetro			Asintótico Inferior	Asintótico Superior	
d	-86,0578	57,889	-203,974	31,8584	d = 0,1
a	3,9196	0,6311	2,6340	5,2051	a = 0,1
b	0,0354	0,0086	0,0177	0,0530	b = 0,1
c	0,0059	0,0055	0,0054	0,0172	c = 0,1
Modelo	RAMAS = -86,0578+exp(3,91957+0,0354012*DAP+0,00590954*HT)				
Estadígrafos	R-Cuadrada = 87,9134%; Error estándar del estimador = 58,3813 Error medio absoluto = 39,2776; Estadístico Durbin-Watson = 1,91588 REMC= 42,48%; DIFA= 0,01%				
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio		
Modelo	1,39731E6	4	349326,0		
Residuo	109068,0	32	3408,4		
Total	1,50637E6	36			
Total (Corregido)	902385,0	35			

4. Resultados

Cuadro 30 Coeficientes de regresión modelo CORTEZA (Modelo 5)

Especie	Roble	DAP mínimo = 10,0 cm		DAP máximo = 66 cm	
Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P	
Intercepto	-0,4405	0,3398	-1,2966	0,2035	
Pendiente	0,1819	0,0095	19,173	0,0000	
Modelo	Corteza (kg) = (-0,440554 + 0,181964*DAP) ²				Y = (a + b*X) ²
Estadígrafos	Coeficiente de Correlación = 0,9567; R-cuadrada = 91,54% Error estándar del estimador = 0,9094; Error absoluto medio = 0,7592; Estadístico Durbin-Watson = 1,32714 (P=0,0161) REMC= 33,26%; DIFA= 2,16%				
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio		
Modelo	304,051	1	304,051	367,60	0,0000
Residuo	28,1219	34	0,8271		
Total (Corregido)	332,173	35			

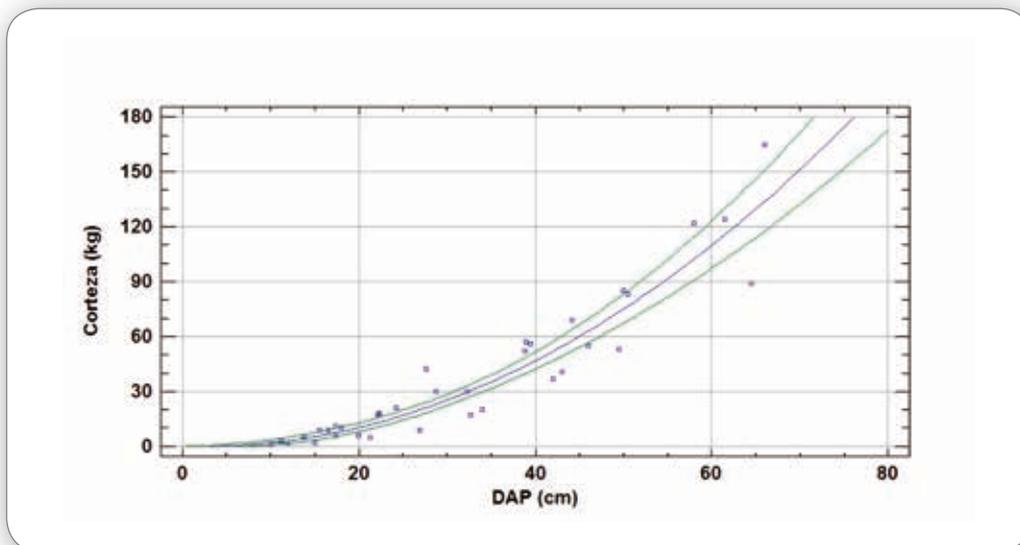


Figura 16.
Modelo 5, Raíz Cuadrada del peso seco de la corteza en kg en función del DAP (cm), Roble. Función: $PSCorteza = (0,440554 + 0,181964 * DAP)^2$

4.8.3 Funciones integradas con datos de proyecto anterior

El modelo integrado con datos de este estudio y datos de un proyecto anterior de la Universidad Austral de Chile (Gayoso *et al.* 2002) mejora levemente el coeficiente de determinación, pero la tasa de error es de magnitud similar al presente estudio. Esto ocurre a pesar de aumentar el tamaño de la muestra, debido probablemente a que incorpora la variabilidad de nuevos sitios y nuevos árboles de grandes dimensiones. El beneficio de este nuevo modelo es la mayor mayor amplitud del rango de DAP y aplicabilidad a toda la zona de distribución de la especie, Cuadro 31. La Figura 17 muestra una comparación de los tres modelos: E2012 (este estudio), UACH (2002) e integrado (E2012+UACH).

Cuadro 31 Coeficientes de regresión modelo con dos variables independientes, Roble integrado

Especie	Roble	DAP mínimo = 5 cm		DAP máximo = 72 cm	
		Estimado	Error Estándar	Intervalo confianza a 95%	
				Asintótico Inferior	Asintótico Superior
d	-262,958	65,9833	-394,494	-131,423	d = 0,1
a	4,9446	0,1929	4,5598	5,3293	a = 0,1
b	0,0336	0,0021	0,0293	0,0378	b = 0,1
c	0,0280	0,0026	0,0228	0,0331	c = 0,1
Modelo	BA (kg) = -262,958+exp(4,94459+0,0335723*DAP+0,0280054*HT)				
Estadígrafos	R-Cuadrada = 96,27%; Error estándar del estimador = 147,719 Error medio absoluto = 91,3981; Estadístico Durbin-Watson = 1,6503 REMC= 25,32% ; DIFA= 0,00%				
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados		GI	Cuadrado Medio	
Modelo	6,50795E7		4	1,62699E7	
Residuo	1,5711E6		72	21820,8	
Total	6,66506E7		76		
Total (Corregido)	4,21459E7		75		

4. Resultados

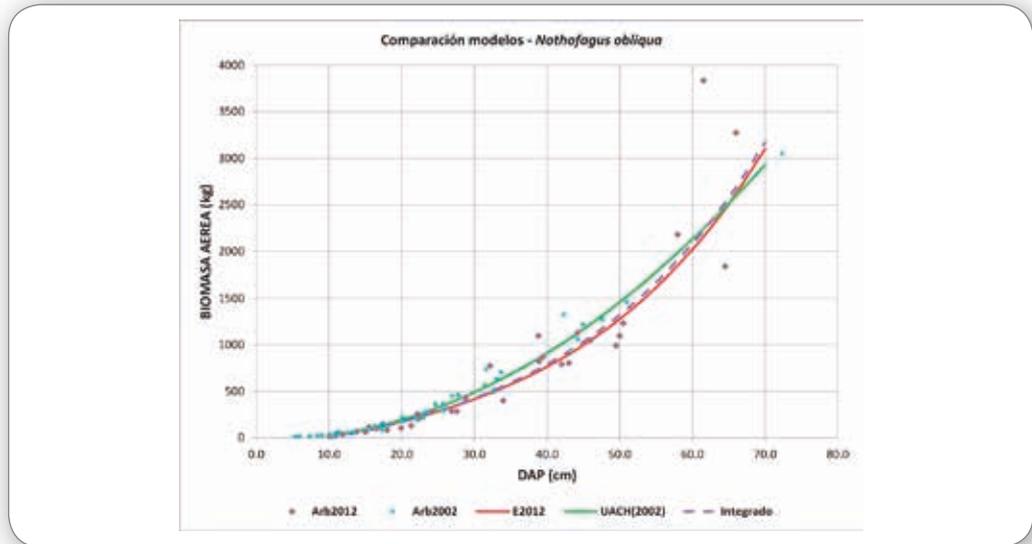


Figura17.

Comparación de modelos para biomasa aérea *Nothofagus obliqua*. Arb2012 (árboles medidos el año 2012); Arb2002 (árboles medidos el año 2002), E2012 (modelo actual); UACH (2002) modelo anterior UACH.

El modelo basado en los datos anteriores de la UACH (línea verde) corre ligeramente sobre la nueva curva de este estudio (línea marrón). Entre 25 y 55 cm de DAP las diferencias alcanzan de 14 a 19%. Si bien el modelo integrado se presenta más conservador, es necesario cuidar su uso en la parte alta de la curva, sobre 50 cm de DAP, donde se observa gran dispersión de los datos. Sobre los 65 cm de DAP sobrepasa el modelo de la UACH (2002). Se desestimó la posibilidad de segmentar el modelo sobre y bajo 50 cm de DAP por la baja cantidad de individuos sobre 50 cm.

5 COMENTARIOS FINALES

Las funciones recogen la variabilidad del clima, suelo, disponibilidad de nutrientes, edad y manejo. Parte de esta variabilidad se observa en las diferencias de esbeltez de los árboles, donde el sitio más restrictivo corresponde al predio La Fusta. Aunque se eligieron árboles sin daño externo aparente, algunos mostraron pudrición central en la base.

Toda esta variabilidad conduce al error que se aprecia en la regresión y que alcanzó al 25% (REMC) para la estimación de la biomasa aérea total; parte importante de esta variación la aportan los árboles de mayor tamaño. 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.

Otra fuente de error corresponde a la determinación de la humedad de los componentes del árbol. Si bien el pesaje en verde es muy preciso, la humedad se determina en base a muestras. Los resultados muestran importantes variaciones del contenido de humedad en el fuste según la posición en el árbol y entre componentes. Esta variación fue considerada en los cálculos de la humedad del fuste, la que se integró desde el tocón a la copa.

El contenido de carbono de la madera del fuste no muestra diferencias significativas a lo largo del fuste, en este sentido para estudios futuros no es necesario hacer un gran número de determinaciones.

6 REFERENCIAS

- Bianchi S, M Miyazawa, E de Oliveira, M Pavan 2008. Relationship between the Mass of Organic Matter and Carbon in Soil. Brazilian Archives of Biology and Technology V.51 (2):263-269.
- CAMPO DIGITAL 2012. Evaluación de biomasa para desarrollo de funciones alométricas en dos especies forestales nativas de Chile. Informe Técnico. Junio 2012.
- CONAF, 1998. Experiencia silvicultural del bosque nativo de Chile. CONAF, Proyecto Manejo sustentable del bosque nativo.
- CONAF. 2011. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios y actualizaciones. Periodo 1997 - 2011. Santiago, Chile. 25 p.
- Donoso, C. 2006. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones, 2006. (Hualpén: Trama Impresores).
- Di Castri, E Hajek 1976. Bioclimatología de Chile. Editorial Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 128 pp.
- Gayoso J, J Guerra 2005 Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos de Chile. Bosque 26 (2): 33-38
- Gayoso J, J Guerra, D Alarcón 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Documento N°1. Proyecto FONDEF Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile Instituto Forestal. 53 p. y 8 Anexos.
- Gayoso J, D Alarcón, G Trincado 2002. Elaboración indicador del Proceso de Montreal 5.a Biomasa total de los ecosistemas forestales y acumulación de carbono. Corporación Nacional Forestal y Universidad Austral de Chile. Valdivia, 37 p y anexos.
- Gutiérrez, N. 2004. Evaluación del crecimiento y rendimiento volumétricos en ensayos de plantación de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina* al aplicar intervenciones silvícolas. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile.
- Iglesias E, V Pérez 1992. Relationships between Organic Carbon and Total Organic matter in Municipal Solid Wastes and City Refuse Composts. Bioresource Technology 41 (1992): 265-272.
- IREN-CORFO 1964. Suelos. Descripciones Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/ BID. 391p.

- 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.
- Navarro A, J Cegarra, ARoig, D García 1993. Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresource Technology* 44: 203-207.
- Périé C, R Ouimet 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Can. J. Soil Sci.* 88: 315-325.
- Pribyl D 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* Vol. 156 (3-4): 75-83.
- Uribe, J. *et al*, 2012. Atlas Bioclimático de Chile. 2012. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 212p. Disponible en: <http://www.agrobiotec.uchile.cl/atlas/files/assets/downloads/publication.pdf> Junio 2012

