



Mapeo de la Cobertura Forestal

► **Volumen, Biomasa y Carbono Forestal**

Sistemas de Monitoreo de Bosques

Herramientas



## Construcción de Funciones de Volumen

INTEGRANDO ESFUERZOS PARA UN  
BUEN MANEJO DE LOS BOSQUES

Programa Regional  
REDD/CCAD-GIZ



Publicado por la

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH







Mapeo de la Cobertura Forestal

► **Volumen, Biomasa y Carbono Forestal**

Sistemas de Monitoreo de Bosques

Herramientas

## Construcción de Funciones de Volumen

INTEGRANDO ESFUERZOS PARA UN  
BUEN MANEJO DE LOS BOSQUES

Programa Regional  
REDD/CCAD-GIZ



Publicado por la

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



# Construcción de Funciones de Volumen

Esta publicación muestra la secuencia técnica-estadística necesaria de abordar para construir Funciones de Volumen útiles para su uso en Inventarios Forestales, en el marco de las actividades del Programa Regional de Reducción de Emisiones de la Degradación y Deforestación de Bosques en Centroamérica y República Dominicana (REDD/CCAD-GIZ). Componente III de Monitoreo y Reporte del Programa.

## **Publicado por:**

Programa Regional REDD/CCAD-GIZ  
Oficina Registrada Apartado Postal 755  
Bulevar, Orden de Malta, Edificio GIZ, Urbanización Santa Elena,  
Antiguo Cuscatlán, La Libertad.  
El Salvador, C.A.  
E [info@reddccadgiz.org](mailto:info@reddccadgiz.org)  
I [www.reddccadgiz.org](http://www.reddccadgiz.org)

## **Responsable:**

Abner Jiménez, Especialista Sectorial.  
Programa REDD/CCAD-GIZ  
[abner.jimenez@giz.de](mailto:abner.jimenez@giz.de)

## **Autores:**

Patricio Emanuelli Avilés - Consultor. Programa REDD/CCAD-GIZ (Sud-Austral Consulting SpA)  
Fabián Milla Araneda - Consultor. Programa REDD/CCAD-GIZ (Sud-Austral Consulting SpA)

## **Equipo Técnico Regional de Monitoreo**

Ramón Díaz, Ministerio de Ambiente, República Dominicana  
Wing Lau, INAFOR, Nicaragua  
Marta Lucia Sanchez, MARENA, Nicaragua  
Magalys Castillo, ANAM, Panamá  
Efraín Duarte, ICF, Honduras  
María Isabel Chavarria, SINAC, Costa Rica  
German Novelo, FOREST DEPT, Belice  
Rolando Montenegro, INAB, Guatemala  
Francisco Rodriguez, MARN, El Salvador

## **Diseño Gráfico:**

Alfonso Quiroz Hernández - Consultor. Programa REDD/CCAD-GIZ (Sud-Austral Consulting SpA)  
Maritza Toledo Vargas

Octubre 2014

Componente: Monitoreo y Reporte

Área Temática: Volumen, Biomasa y Carbono Forestal

Enfoque Regional

ISBN 978-956-358-206-2

1. INTRODUCCIÓN	4	
	5	1.1 Funciones de volumen local o tarifas
	6	1.2 Funciones de volumen general
2. CONSTRUCCIÓN DE FUNCIONES DE VOLUMEN	9	2.1 Obtención de los datos básicos
	16	2.2 Ajuste de modelos
	18	2.3 Preselección de modelos
	19	2.4 Selección de modelos
3. VALIDACIÓN DE FUNCIONES DE VOLUMEN	20	
4. SECUENCIA PRÁCTICA DE CONSTRUCCIÓN DE FUNCIONES DE VOLUMEN	25	4.1 Etapa de planificación
	27	4.2 Etapa de captura de información en terreno
		4.3 Etapa de procesamiento de información
5. EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE FUNCIONES DE VOLUMEN GENERALES PARA ESPECIES INDIVIDUALES Y GRUPOS DE ESPECIES	34	
	38	5.1 Funciones de Volumen por Especie
	39	5.2 Función de Volumen de especies agrupadas
6. RECOPIACIÓN Y EVALUACIÓN DE FUNCIONES EXISTENTES	41	
	42	6.1 Ejemplo práctico de Recopilación de Funciones Dendrométricas de Bosques Naturales en Chile
	48	6.2 Recomendaciones para la recopilación de funciones de volumen, biomasa, modelos fustales, etc. en Centroamérica.
7. BIBLIOGRAFÍA	50	

## 1. Introducción

El manual de la FAO (1981), citado por Prodan et al. (1997), sobre inventarios forestales presenta diversas definiciones de tipos de volúmenes, a saber:

- **Volumen bruto:** Es el volumen de una parte específica de un árbol sin corteza y sin deducción por defectos; cuando se usa, el término debe calificarse por una palabra o declaración especificando la porción del árbol a la que se refiere.
- **Volumen neto:** Volumen de una parte específica de un árbol sin corteza, hechas las deducciones por defecto o partes no útiles; este término también se calificará de acuerdo con la porción del árbol a la que se refiere.
- **Volumen total:** Volumen correspondiente al fuste principal de un árbol; para los árboles de forma delicuescente, hasta el punto de inicio de la copa; para los árboles de forma excurrente, hasta la punta del árbol.
- **Volumen de ramas:** Para los árboles de forma excurrente, el volumen de todas las ramas; para los árboles de forma delicuescente, el volumen por encima del punto de inicio de la copa (y algunas ramas que puedan salir más abajo).
- **Volumen industrial:** El volumen neto potencialmente útil de madera rolliza, sin deducción por pérdidas debidas a la utilización de tipos de corta y procesos de manufactura; es igual a la suma de los volúmenes de trozas más otros volúmenes aprovechables.
- **Volumen de productos:** Volumen neto de un árbol, considerado apropiado para trozas para chapas, trozas de aserrío, trozas para durmientes, pilotes y postes; este volumen se puede identificar también como madera pulpable, para tableros de partículas u otros usos industriales.

Las mediciones necesarias para cubicar un árbol y calcular su volumen son costosas y lentas. Es de interés entonces el poder estimar el volumen.

Las funciones de volumen se obtienen por regresión, usando una muestra de árboles en los que se mide el volumen y las variables predictoras. Teniendo la función el volumen de otros árboles se puede estimar conociendo solo el valor de los predictores (García, 1995). Según Cancino (2006) hay dos principios básicos involucrados en la construcción de funciones de volumen:

el primero asume que el volumen del árbol depende del diámetro, la altura y la forma del fustal; el segundo asume que una función que determine correctamente el volumen de un árbol también es válida para otros árboles de igual diámetro, altura y forma.

Existe una variedad de modelos posibles para ajustar funciones de volumen individual, para decidir cuál de ellos usar deben considerarse aspectos de simplicidad, objetividad y precisión.

Dependiendo de la estructura del modelo usado para ajustar la relación entre el volumen del árbol y otras variables de más fácil medición, las funciones obtenidas pueden clasificarse en (Cancino, 2006):

- i. funciones de volumen local, que incorporan el DAP como única variable independiente;
- ii. funciones de volumen general, cuyas variables independientes son el DAP y la altura; y
- iii. funciones de volumen con clase de forma, que incorporan el DAP, la altura y la forma como variables independientes.

## 1.1 Funciones de volumen local o tarifas

Las funciones de volumen local relacionan el volumen del árbol con sólo una variable dependiente, generalmente el diámetro normal o de referencia (DAP) o transformaciones y potencias de esta misma variable. Son útiles cuando la altura y forma fustal son constantes o presentan una variabilidad baja. El calificativo de local se debe a que estas funciones son de aplicación limitada al área, para la cual es aplicable la relación diámetro / altura implícita en el modelo de volumen; generalmente una cierta clase de edad y un mismo sitio (Prodan et al., 1997).

Los modelos de volumen local son simples y algunos de uso corriente se entregan a continuación (Prodan et al., 1997):

Dissescu-Stanescu (1956)	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^2$
Hohenadl, Krenn (1944)	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP} + b_2 \text{ DAP}^2$
Kopezki-Gerhardt (1899)	$V = b_0 + b_1 g$

Donde:

V: volumen (m<sup>3</sup>)

DAP: diámetro altura del pecho (cm)

g: área basal del árbol (m<sup>2</sup>)

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub>: coeficientes de regresión

El modelo local de volumen que emplea como variable independiente el área basal del árbol (g) se denomina línea de volumen, debido a que esta transformación linealiza la relación volumen- diámetro y su diagrama de dispersión se muestra como una línea recta.

Otro modelo comúnmente usado es el de Berkhout:

$$V = b_0 \text{ DAP}^{b_1}$$

Que al linealizarse queda:

$$\log V = b_0 + b_1 \log \text{ DAP}$$

## 1.2 Funciones de volumen general

Se denominan funciones generales de volumen los modelos que estiman el volumen con dos o más dimensiones del árbol, por lo general el diámetro y la altura y en algunos casos una expresión de la forma. Este último tipo de ecuaciones de volumen se denominan funciones de volumen de clase de forma; corrientemente se utilizan en Estados Unidos e incluyen como predictor, además del diámetro y la altura, el cociente de forma de Girard (Prodan et al., 1997).

Las funciones generales de volumen son de aplicación más amplia que las locales, debido a que la relación diámetro-altura está explícita en el modelo, lo que facilita su uso para clases de edad y sitio diferentes. Muchos de los modelos de volumen general incluyen como predictores sólo el diámetro de referencia y alguna expresión de la altura; las razones que apoyan este tipo de formulación son citadas en Clutter et al (1983), citado por Prodan et al. (1997):



- Mediciones de diámetros en altura son difíciles de realizar.
- Variaciones en la forma de los árboles: éstas tienen un impacto menor en el volumen que la variación en altura o diámetro.
- Para algunas especies, la forma es relativamente constante e independiente del tamaño.
- En algunas especies, la forma de los árboles está a menudo correlacionada con el tamaño de los árboles; de modo que diámetro y altura generalmente explican gran parte de la variación del volumen causada por la forma.

La función de volumen más conocida es la denominada de variables combinadas (Spurr, 1952; citado por Prodan et al., 1997):

$$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^2 H$$

Este modelo, ajustado sin intercepto, se denomina de factor de forma constante, dado que la expresión  $\text{DAP}^2 H$ , al ser multiplicada por la constante  $\pi / 40.000$ , representa el volumen de un cilindro; de esta manera, en el modelo sin término constante, el coeficiente de regresión  $b_1$  representaría el factor de forma falso que reduce el cilindro para transformarlo en volumen del árbol (Prodan et al., 1997).

Algunos modelos de volumen general, comúnmente utilizados son (Prodan, 1997):

Factor de forma constante	$V = b_1 \text{ DAP}^2 H$
Variables combinadas generalizadas	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^2 + b_2 H + b_3 \text{ DAP}^2 H$
Logarítmico sin intercepto	$V = b_1 \text{ DAP}^{b_2} H^{b_3}$
Logarítmico con intercepto	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^{b_2} H^{b_3}$
Variables transformadas de Honer	$V = \text{DAP}^2 / (b_0 + b_1 H^{-1})$
Clase de forma (f)	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^2 H^f$
Australiana de Stoa	$V = b_0 + b_1 \text{ DAP}^2 + b_2 \text{ DAP}^3 + b_3 H + b_4 / H$

Donde:

V: volumen ( $\text{m}^3$ )

DAP: diámetro altura del pecho (cm) H: altura Total (m)

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  y  $b_4$ : coeficientes de regresión

Los modelos de volumen individual incluyen modelos lineales y no lineales en los parámetros. Los primeros se ajustan mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios o ponderados, dependiendo del comportamiento de la varianza del volumen; el segundo tipo requiere de métodos de ajuste no lineales. Algunos modelos no lineales pueden linealizarse mediante logaritmos para facilitar su ajuste y/o homogeneizar la varianza. Los modelos pueden servir para representar el volumen del árbol independiente de la unidad utilizada para expresarlo o del tipo de volumen que se trate (total, comercial, fuste, ramas, etc.) (Cancino, 2006).

La forma de relación entre el volumen y otras variables del árbol se puede detectar fácilmente mediante análisis gráfico. En general, la relación entre el volumen y variables simples como DAP, altura y clase de forma es no lineal; variables derivadas de las variables simples permiten linealizar la relación y reducir la varianza residual del volumen.

---

## 2. Construcción de funciones de volumen

---

### 2.1 Obtención de los datos básicos

La primera interrogante a resolver en esta etapa está relacionada con la elección de la muestra. Al respecto Romahn de la Vega et al (1994) señalan algunas condiciones prácticas a tener en consideración:

- La muestra debe ser plenamente representativa de la población considerada: así, por ejemplo, si la masa en estudio está constituida por arbolado maduro una muestra conformada por árboles jóvenes llevará la estimación sesgada del volumen.
- El área de distribución de la muestra debe coincidir con el de la población: si la masa arbolada para la cual se ha de construir la función de volumen ocupa una amplia superficie, una muestra de árboles escogidos todos en una zona aislada muy pequeña conducirá a errores pues reflejará efectos estrictamente locales que no pueden ser extrapolados a toda la población.
- La muestra debe incluir sujetos de todas las categorías diamétricas ocurrentes: principalmente porque las funciones obtenidas por análisis de regresión son útiles para la interpolación y no para la extrapolación en las estimaciones que se realizan con ellas.
- El número de árboles que se requiere para asegurar la obtención de una buena función de volumen aumenta con la amplitud en la variación del diámetro y la altura. A mayor variabilidad mayor será el número de árboles necesarios para cumplir con una precisión preestablecida, fijada de acuerdo a los objetivos del análisis y las restricciones presupuestarias que puedan existir.

Las mediciones de campo pueden realizarse de dos maneras: sobre árboles volteados (método destructivo) o sobre árboles en pie (método no destructivo).

En ambos casos, la información obtenida en terreno para cada árbol-muestra debe ser, como mínimo, la siguiente:

- **DAP** (diámetro a 1,3 m sobre el suelo) y espesor de corteza
- **Diámetro de tocón** (diámetro a 0,3 m sobre el suelo) y espesor de corteza
- **Altura Total**
- **Diámetros a una distancia preestablecida** (cada 2 m por ejemplo) o a una proporción de la altura total del árbol (cada 1/10 H por ejemplo), y los correspondientes espesores de corteza
- **Especie**

En el caso del método destructivo el árbol puede ser efectivamente trozado, con lo cual se medirá el diámetro sin corteza de cada extremo de la troza directamente con una regla o huincha metálica (Fig. 1a), o se efectúa la marcación del largo de cada troza (Fig. 1b) para efectuar la medición del diámetro con cinta o forcípula (Fig. 1c), registrando necesariamente a la vez el espesor de corteza en cada punto (Fig. 1d) a fin de descontarlo para obtener el volumen sin corteza de cada sección.



Fig. 1.  
Medición de diámetro de la troza con huincha (a) y marcación de los puntos de medición del diámetro y espesor de corteza (b), utilizando forcípula (c) y calibrador de corteza (d) respectivamente.

Normalmente a través del volteo de árboles se procede a la medición de diámetros a diferentes alturas, pero no obstante existen otras metodologías que han sido utilizadas para cumplir con este objetivo generando los denominados métodos no destructivos, los cuales se basan principalmente en la utilización de instrumentos ópticos o electrónicos conocidos como dendrómetros.

En el caso de los instrumentos ópticos, uno de éstos es el relascopio de espejos de Bitterlich (Fig. 2), instrumento que permite, además, la medición de altura, pendiente, distancia y área basal del rodal mediante el muestreo puntual horizontal. Desde comienzos de la década de los noventa, están también siendo usados dendrómetros láser.



Fig. 2.  
Relascopio de espejos de Bitterlich utilizado para la medición de diámetros a distintas alturas.

Para el caso del uso del relascopio, Salas et al. (2005) compararon su utilización y el de la forcípula finlandesa (Fig. 3) en la medición de diámetros fustales y en la estimación del volumen fustal a partir de dichas mediciones en bosques naturales de Chile. A treinta y siete árboles de especies nativas del bosque multietáneo del predio Rucamanque (Región de la Araucanía, Chile), seleccionados en forma aleatoria, se les midieron los diámetros fustales a los 2, 4 y 6 metros de altura con el relascopio y la forcípula finlandesa. Los valores control se obtuvieron mediante medición directa sobre el fuste en pie con forcípula tradicional, usando una escalera de 6 metros. El relascopio entregó estimaciones insesgadas para todos los diámetros evaluados; sin embargo, la forcípula presentó un sesgo significativo ( $-2,2\%$ ) en la medición del diámetro a los 2 metros de altura. El volumen fustal hasta los 6 metros, estimado mediante las mediciones efectuadas con el relascopio son insesgadas ( $-0,5\%$ ), mientras que con la forcípula finlandesa también se produjo una sobreestimación significativa de  $-2,4\%$ ; no obstante, con este instrumento se logra una leve mayor precisión. La eficiencia (relación sesgo/tiempo de medición) del relascopio en la obtención de variables necesarias, para estimar el volumen fustal hasta los 6 metros de altura, es un 100% mayor que con la forcípula finlandesa.



Fig. 3.  
Forcípula finlandesa para la medición de diámetros a distintas alturas.

Un caso de aplicación de instrumentos de tecnología laser es el del Inventario de la Reserva Nacional Valdivia en Chile (Emanuelli, 1999) en donde las mediciones de los árboles-muestra necesarios para la construcción de las funciones de volumen se realizaron con el instrumento LEDHA-GEO (Fig. 4), el cual fue diseñado para la medición e inspección de árboles en el bosque, empleando una moderna tecnología láser. El instrumento, permite medir variables como distancias, diámetros y ángulos, además de contar con 10 programas de medición. Posee una computadora integral que puede calcular parámetros del árbol por correlación de datos integrados por los diversos sensores incorporados, tales como reflectores, brújula electrónica y sensor angular. El instrumento favorece particularmente tareas de inventarios de un bosque, investigaciones científicas o la permanencia de madera en pie de un área boscosa.

El LEDHA-GEO se puede utilizar como un par de binoculares dejando retenidas las teclas para el posterior ingreso de datos. El instrumento -en resumen- provee la siguiente información del árbol:

- Azimut de un árbol, medición que realiza con la brújula electrónica interna.
- Distancia entre el instrumento y el fuste de un árbol, a través de reflectores.
- Altura del árbol, la que se realiza con la lectura en tres puntos del árbol: Base, Fuste y Cima del árbol.
- Diámetro del árbol (puede almacenar hasta 5 diámetros de un árbol), con resultados precisos al centímetro. La determinación del diámetro se realiza ingresando datos de acuerdo a una escala interna del instrumento, es decir, se



posiciona el instrumento a una distancia determinada de un árbol, se ingresan los valores referenciales y combinado con el trabajo del láser interno, se obtiene el diámetro del árbol. La distancia máxima entre el árbol y el instrumento es de 100 m.



Fig. 4.  
Vista del dendrómetro laser LEDHA-GEO (a) y su utilización en terreno (b).

Otros instrumentos similares disponibles hoy en el mercado son el dendrómetro Criterion RD 1000 (<http://www.gisiberica.com/Relascopios/relascopio.htm>) (Fig. 5a) y el dendrómetro LaserACE 3D ([http://www.cartex.es/HS200\\_laserace\\_3d.pdf](http://www.cartex.es/HS200_laserace_3d.pdf)) (Fig. 5b). Ambos de muy similar valor ya que el primero tiene un precio de mercado de € 1.995 y el segundo un valor de compra de € 1.999, valores que además son casi idénticos al del conocido relascopio reflector de Bitterlich.



Fig. 5.  
Dendrómetro Criterion RD 1000 (a) y dendrómetro LaserACE 3D (b).

Otra alternativa del método no destructivo es la planteada por Costas et al. (2006) quienes construyeron funciones de volumen para especies de bosque secundario de la Reserva Guaraní, en Misiones, Argentina. Dado que el trabajo se efectuó en un área donde se continuará investigando la evolución del bosque, no se realizó el volteo de los árboles seleccionados para no alterar las parcelas de investigación. Las mediciones de los diámetros a diferentes alturas se realizaron sobre los árboles en pie utilizando escalera portátil y cinta diamétrica (Fig. 6). Las alturas de medición en las cuales se registraron los diámetros fueron las siguientes: 0,25 m, 1,30 m, 2 m, 4 m y 5,10 m. Dado que por cuestiones logísticas no fue posible medir los diámetros superiores a 5,10 m de altura, se procedió al ajuste de la función de forma de Peters de 5° grado, la cual fue utilizada para predecir el diámetro en la parte superior del fuste.





Fig. 6.  
Medición de diámetros a diferentes alturas utilizando escalera portátil y cinta diamétrica.

La cubicación de cada árbol-muestra se realiza utilizando la fórmula de Smalian (Cailliez, 1980; Prodan et al., 1997; Cancino, 2006):

$$V = ((S_1 + S_2) / 2) * L$$

Donde,

V : volumen de la troza (m<sup>3</sup>)

S<sub>1</sub> : sección inicial de la troza (m<sup>2</sup>)

S<sub>2</sub> : sección final de la troza (m<sup>2</sup>)

L : longitud de la troza (m)

Dado que se asume que las secciones de cada troza son circulares ( Si =  $\pi (Di/2)^2$  ) y que el diámetro en cada extremo de la troza se mide directamente en cm, entonces la expresión final más directa de cálculo del volumen queda dada por:

$$V = (\pi / 40.000) * ((D_1^2 + D_2^2) / 2) * L$$

Donde,

V : volumen de la troza (m<sup>3</sup>)

D<sub>1</sub> : diámetro de la sección inicial de la troza (cm)

D<sub>2</sub> : diámetro de la sección final de la troza (cm)

L : longitud de la troza (m)

A través de esta expresión, se determina el volumen sólido sin corteza de cada trozo generado por la medición de diámetros a distintas distancias (o alturas) y, por adición, el volumen total de cada árbol-muestra, previo descuento de la corteza, lo cual se realiza utilizando los valores de espesor de corteza medidos. Con este procedimiento es posible calcular el volumen total del fuste o los volúmenes sólidos sin corteza hasta distintos diámetros límite de utilización según las posibilidades de los productos a obtener de cada especie.

## 2.2 Ajuste de modelos

Teniendo los datos básicos (volumen y variables predictoras para cada árbol) y previo al ajuste, de acuerdo a lo que indica Gujarati (1981), se debe verificar los supuestos básicos del ajuste por análisis de regresión mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Esto es docimar el supuesto de normalidad, homocedasticidad e independencia (no autocorrelación) de residuos.

Para ello algunas pruebas que se pueden realizar en cada caso son:

### a) Normalidad:

Prueba de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto sobre la base de los residuos del modelo (Gujarati, 1992).

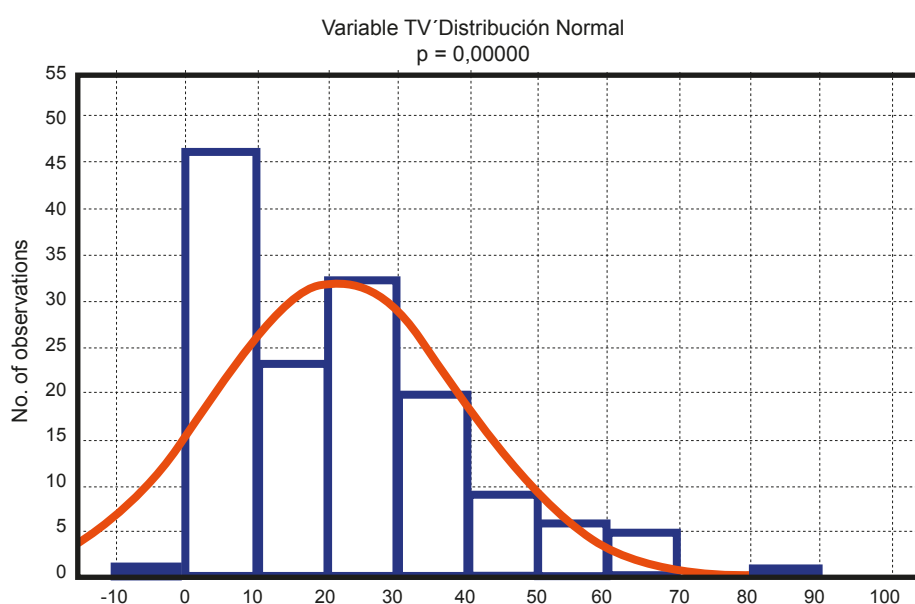


Fig. 7.  
Gráfico para el análisis de distribución normal de la variable dependiente TV' (Fuente: Benítez, 2009).

Otra posibilidad es el test t de Student para verificar que la media de los errores es igual a 1 y test Chi Cuadrado para verificar que la varianza de los errores es estadísticamente igual a 1 (Harnett y Murphy, 1987).

Como alternativa a las dójimas de hipótesis precedentes está el análisis gráfico representando la frecuencia de la variable dependiente, previamente establecidos rangos de igual amplitud para ella (Fig. 7).

#### **b) Homogeneidad de varianzas:**

Test de Bartlett (Steel y Torrie, 1997), sobre los datos de volumen de la muestra en donde este test permite trabajar con tamaños distintos de muestra para cada categoría de la variable independiente. Si los tamaños de muestra son iguales es posible utilizar el test de Cochran.

Como alternativa está la prueba de Rango de Spearman para evidenciar la existencia de homogeneidad de varianza sobre los residuos (Gujarati, 1992). Spearman, utiliza los residuos del modelo en análisis para determinar la presencia de heterocedasticidad en cada una de sus variables explicatorias.

Otra opción para verificar el supuesto de homocedasticidad es el test de White (Leiva, 1999). Este test contrasta la hipótesis nula de ausencia de heterocedasticidad sin suponer una forma funcional concreta para la varianza de los residuos (Jerez y Sotoca, 2010).

Adicionalmente, también es posible utilizar el test de Levene. Este test consiste en realizar un análisis de variancia (ANOVA), usando como variable dependiente el valor absoluto de los residuos. Si el valor p del factor tratamiento de este ANOVA es menor al valor de significación nominal se rechaza la hipótesis de varianzas homogéneas, caso contrario el supuesto de igualdad de varianzas puede ser sostenido (Infostat, 2002; citado por Avanza et al., 2002).

#### **c) Independencia:**

Prueba de Durbin – Watson para verificar la no existencia de autocorrelación o independencia de los datos (Gujarati, 1992).

Adicionalmente es posible realizar un análisis gráfico de los residuos en función de la variable independiente, en donde si estos se comportan de manera aleatoria es posible concluir la independencia de ellos (Fig. 8)

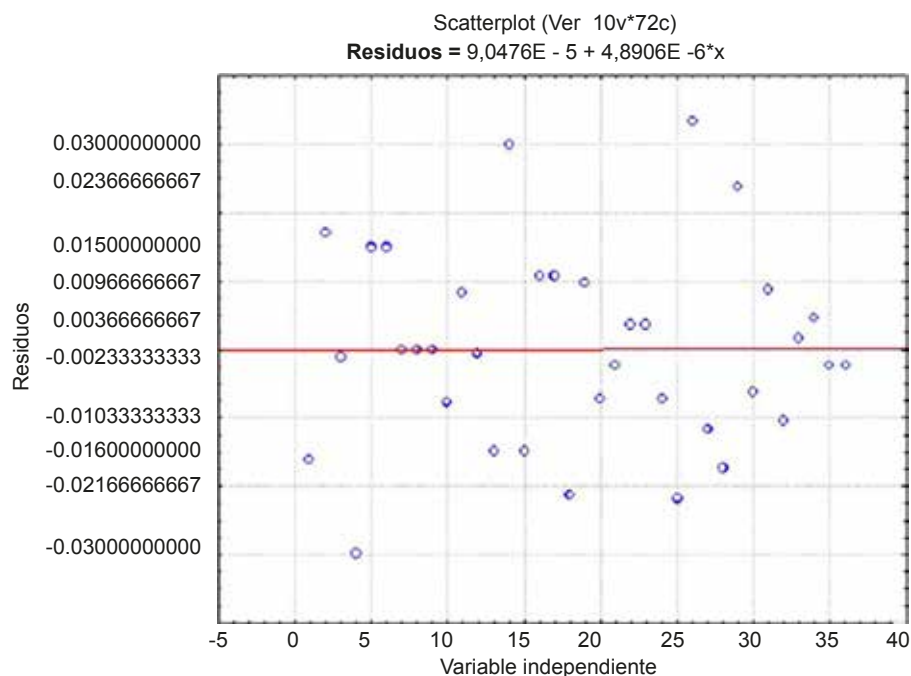


Fig. 8.  
Gráfico de residuos en función de la variable independiente.

Verificados los supuestos se realizan los ajustes de los modelos. El ajuste se realiza a través del Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios, el cual busca minimizar la suma de cuadrados de las diferencias existentes entre los puntos del diagrama de dispersión (valores reales) y determinados puntos de la familia de curvas elegidas (valores estimados) (Muxica, 1963).

De no cumplirse alguno de los supuestos se procede a realizar transformaciones de la variable dependiente y/o de la variable independiente, generándose nuevos modelos para los cuales debe procederse a verificar los supuestos.

## 2.3 Preselección de modelos

Para preseleccionar el mejor modelo, se docima la existencia de relación lineal entre las variables realizando la prueba “R”, la significancia estadística de los modelos a través de la prueba “F” y la significancia estadística de los coeficientes de regresión a través del test “t” para cada modelo ajustado (Gujarati, 1992).

Al no existir una relación lineal entre las variables, como también la presencia de coeficientes de regresión no significativos, o la ausencia de significancia del estadígrafo “F”, es causa de eliminación de los modelos del análisis (Gujarati, 1992).

Entre los modelos que cumplen los test anteriores, se ven todos aquellos que tengan la misma variable dependiente y se preselecciona aquel que tenga el mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), o del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) cuando los modelos consideran distinto número de variables explicatorias, y el menor error estándar de estimación (EEE).

## 2.4 Selección de modelos

Posteriormente, entre los modelos preseleccionados para cada forma funcional de la variable dependiente de acuerdo a la metodología expuesta anteriormente, se realiza la selección del mejor modelo ajustado. Para ello es posible utilizar una variedad de criterios como el Error Cuadrático Medio (ECM) (Prodan et al, 1997; Leiva, 1999), la diferencia agregada global (DAG) y la diferencia media (DM) (Cancino, 2006). Para cualquiera de estos indicadores debe preferirse aquel modelo que entregue el valor más bajo. La forma de cálculo para estos indicadores son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{ECM} &= \sum (V_r - V_e)^2 / n \\ \text{DAG} &= (\sum V_r - \sum V_e) / \sum V_e \\ \text{DM} &= (\sum V_r - V_e) / (n \sum V_e) \end{aligned}$$

Donde:

$V_r$  : volumen real u observado

$V_e$  : volumen estimado por el modelo

$n$  : tamaño de la muestra

Seleccionada la mejor función para la predicción del volumen, su uso debe limitarse a las condiciones de ajuste o representatividad de la muestra de árboles. Así, es conveniente que junto con presentar la función y algunos aspectos estadísticos se incorporen los siguientes antecedentes sobre ella (Cancino, 2006):

- especie o grupo de especies a las que es aplicable
- localidad, o rango geográfico, para el que es válida
- definición de las variables independientes y el rango de estas en la muestra usada
- tamaño de la muestra
- medida apropiada de la precisión

---

### 3. Validación de funciones de volumen

---

Después del desarrollo de una función de volumen para la que se han evaluado buenas medidas de ajuste, se procede a usarla en predicciones o estimaciones, control de actividades, o en aprender y concluir sobre los mecanismos que generan los datos. Además, cuando se comprueba que un modelo entrega buenas estimaciones dentro del rango observado de las variables independientes (interpolación), generalmente existe la tentación o necesidad de utilizarlo fuera del rango de los datos observados en su construcción (extrapolación), razón por la que examinar las propiedades de extrapolación de los modelos es un objetivo importante en el denominado proceso de validación (Prodan et al., 1997).

Hay conciencia en los usuarios de modelos que antes que puedan ser utilizados, deben realizarse pruebas y controles sobre su validez y calidad de sus predicciones para así establecer la confianza del modelo empleado. Aún cuando las medidas de ajuste tales como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error estándar de la estimación (EEE), frecuentemente presentados junto a una función de volumen, son criterios importantes para evaluar el ajuste de una ecuación de regresión, su uso en predicciones fuera del rango de los datos de origen, o en un área de condiciones de suelo, clima o actuaciones silvícolas también distintas a la de su base de construcción, hace necesario que deban utilizarse criterios que permitan evaluar la calidad predictiva.

Según Prodan et al.(1997), para que la validación sea confiable, la muestra a usar para este proceso debe cubrir todas las condiciones de edades, sitios y manejos en donde operan él o los modelos. De aquí se derivan dos recomendaciones importantes:

- a) La muestra de validación debe ser grande, con un tamaño mínimo de  $n = 100$ .
- b) Los árboles que se utilicen en la validación deben proceder de mediciones muestrales realizadas (grupos de árboles) de manera que sea posible analizar la muestra según distintas variables de estado de los rodales.

Un ejemplo práctico de esta situación es el trabajo desarrollado por Sáez y San Martín (1998) quienes validaron las funciones generales de volumen de *Eucalyptus nitens* de Castro (1993) y la presentada por Drake (1994), y la función de volumen de *Eucalyptus globulus* presentada por Prado y Barros (1989), a fin de comprobar la aplicabilidad de ellas en plantaciones de *Eucalyptus nitens* de la zona de Mulchén, Región del Bío Bío, Chile. En este estudio se trabajó sobre

la base de 410 árboles a los que se midió su volumen real, en un total de 20 rodales con edades entre 3 y 8 años, diámetro a la altura del pecho de 6 a 28 cm, y altura total entre 5 a 25 metros.

Aún así, es posible trabajar con muestras de menor tamaño cuando el objetivo es aplicar la función existente en una zona específica y no en todo el espectro de condiciones dendrométricas, climáticas, de suelo o silvícolas en que se desarrolla la especie forestal de interés. Un ejemplo de este hecho es el trabajo de Leiva (1999) quien construyó una función de volumen para álamo negro (*Populus nigra*) y posteriormente la validó para su aplicación a un predio en particular sobre una base de 33 árboles.

De los árboles- muestra necesarios para la validación debe obtenerse la misma información indicada para el caso de la construcción de funciones de volumen y, por ende, es posible utilizar tanto el método destructivo como la medición de diámetros a distintas alturas con los árboles en pie.

Para validar los modelos deben utilizarse medidas de exactitud y sesgo de las estimaciones. Tres estadísticos para medir exactitud se presentan frecuentemente en la literatura (Cao et al., 1980):

a) Raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC)

$$\text{REMC} = (\sum (V_r - V_e)^2 / n)^{0.5}$$

b) Error medio absoluto (EMA)

$$\text{EMA} = \sum V_r - V_e / n$$

La diferencia entre los estadísticos REMC y EMA es mínima y será notoria sólo si se presentan en los modelos valores residuales extremos; la expresión cuadrática es sensible a ellos.

Como medida de sesgo se utiliza la media de los residuales, denominada frecuentemente diferencia agregada. Si el modelo es insesgado, se espera que la suma de este sea cercana a cero. Sin embargo, si el modelo resulta sesgado, la suma de los residuales será diferente de cero. La expresión de medida de sesgo es la siguiente:

c) Diferencia Agregada (DA)

$$\text{DA} = \sum (V_r - V_e) / n$$

En el estadístico usado para la detección del sesgo, los signos negativos están asociados con sobrestimaciones, en tanto que valores positivos de DA indican subestimación.

Para analizar la capacidad predictiva de los modelos es posible utilizar la forma porcentual de los estadísticos de exactitud y sesgo, donde estos se expresan en relación a la media de los valores observados ( $V_r \text{ med}$ ). Así, Pérez (2004) señala que las expresiones anteriores quedan de la siguiente forma:

$$\text{REMC (\%)} = (\text{REMC} / V_r \text{ med}) * 100$$

$$\text{DA (\%)} = (\text{DA} / V_r \text{ med}) * 100$$

Los valores a asignar como máximos permisibles para cada estadístico dependen de la exigencia que imponga el evaluador a la exactitud y sesgo de las predicciones. A modo de ejemplo Pérez (2004) en la comparación de funciones de volumen y ahusamiento para renovales de Roble en la Décima Región, Chile, fijó un 10% para el error y un 5% para el sesgo como valores máximos.

Una metodología alternativa para la validación de la exactitud de funciones de volumen es la propuesta por Vallejos (1979) y que se fundamenta en los planteamientos hechos por Freese (1960). Esta metodología consiste en efectuar una regresión lineal entre los valores estimados por la función de volumen ( $V_e$ , variable dependiente) y los valores reales de volumen ( $V_r$ , variable independiente), analizando después estadísticamente, mediante el test t Student, el valor que toma el intercepto y la pendiente de esta función auxiliar para clasificar el sesgo de la función de volumen.

Función auxiliar:

$$V_e = b_0 + b_1 V_r$$

Hipotéticamente, si existiera una perfecta correspondencia entre el volumen estimado ( $V_e$ ) y el volumen real ( $V_r$ ), el ajuste (función auxiliar) entregaría una relación funcional cuya constante de regresión tendría valor cero y el coeficiente de regresión valor unitario. Se generan así entonces distintas manifestaciones de sesgo:

- El ajuste obtenido no entrega diferencias significativas respecto a las restricciones de que la pendiente de la recta es igual a uno y el intercepto es igual a cero: la estimación es insesgada (Fig. 9a).
- Para el ajuste realizado se presentan diferencias significativas para la condición impuesta al intercepto pero la pendiente es estadísticamente igual a uno: la función de volumen estará sobreestimando o subestimado en forma constante (sesgo constante) (Fig. 9b).



- Para la función auxiliar se presentan diferencias significativas para la condición impuesta a la pendiente pero el intercepto es estadísticamente igual a cero: la función de volumen estará sobreestimando o subestimado en forma variable (sesgo variable) (Fig. 9c).
- El ajuste obtenido entrega diferencias significativas para ambas condiciones: la estimación presenta sesgo variable. En este caso la función de volumen puede comportarse de dos formas: únicamente sobre o sub estima a través de todo el rango de valores observados, o a partir de un cierto punto de este rango subestimar en un sentido y sobre estimar en el otro (Fig. 9d).

Una vez caracterizado el sesgo asociado a la función de volumen se procede a determinar su exactitud fijando el error máximo admisible y utilizando para ello una prueba chi-cuadrado ( $\chi^2$ ). El valor muestral asociado al estadístico  $\chi^2$  se determina de acuerdo al tipo de sesgo determinado previamente, generándose 3 posibilidades:

a) La estimación es insesgada:

$$\chi^2 = (196^2/p^2) * \sum (J_i - 1)$$

b) La estimación presenta un sesgo constante:

$$\chi^2 = (196^2/p^2) * [ \sum J_i^2 - ( \sum J_i )^2 / n ]$$

c) La estimación tiene un sesgo variable:

$$\chi^2 = (196^2/p^2) * ( [ \sum J_i^2 - ( \sum J_i )^2 / n ] - W^2 / Q )$$

Con:

$$W = [ \sum J_i I_i - ( \sum J_i \sum I_i ) / n ]$$

$$Q = \sum I_i - ( \sum I_i )^2 / n$$

Expresiones en donde:

$p$  : error admisible (%)

$J_i$  :  $V_{e_i} / V_{r_i}$

$I_i$  :  $1 / V_{r_i}$

196 : valor de la normal estándar para muestras de tamaño superior a 120, si la muestra es más pequeña se reemplaza por  $z^{*100}$

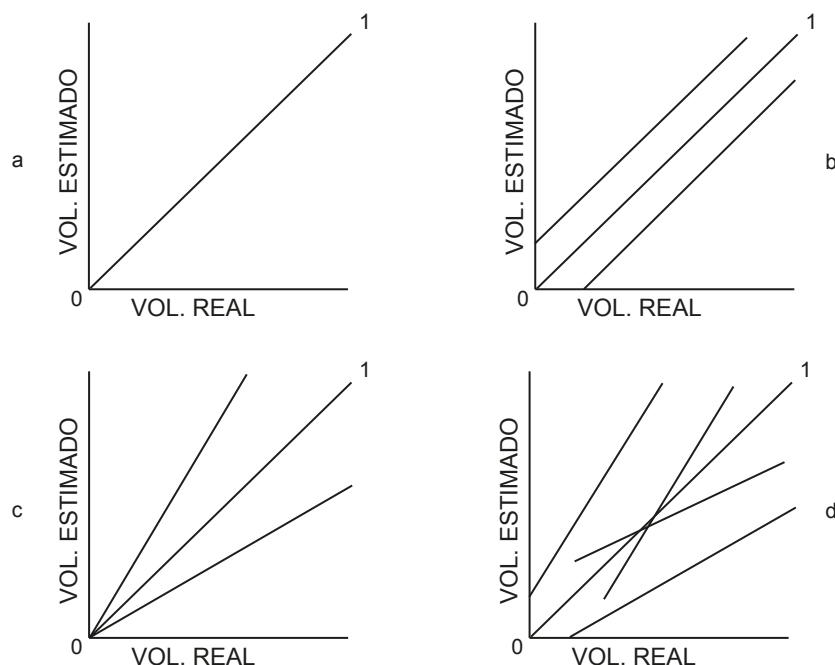


Fig. 9.  
Expresiones posibles del sesgo en la función de volumen (Fuente: Vallejos, 1979).

Si el valor muestral calculado es menor que el valor crítico del estadístico  $\chi^2$  se infiere que la estimación proporciona la exactitud requerida. Si la función de volumen es exacta y presenta sesgo, este se corrige utilizando el modelo de predicción inversa de Ostle (1973) utilizando el intercepto y la pendiente de la función auxiliar.

Modelo de predicción inversa de Ostle:

$$V_r = (V_e - b_0) / b_1$$

Respecto al nivel de error a establecer para la prueba de exactitud de la función, este depende de la exigencia que establezca quien efectúa la validación. A modo de ejemplo, Vallejos (1979) aplicando la metodología descrita impone a las funciones de volumen analizadas una exactitud del 10% , mientras que Leiva (1999) no impone un error a priori si no que calcula, según el tipo de sesgo de la función, el nivel de error que las funciones probadas están entregando, seleccionando aquella que presenta un error del 27,03% por sobre la que entrega un error del 42,02%.

## 4. Secuencia práctica de construcción de funciones de volumen

### 4.1 Etapa de planificación

#### **Paso 1: Definición de especie(s) a trabajar.**

Previo a cualquier tipo de avance en la temática de construcción de funciones de volumen o de otra variable dendrométrica de interés, es absolutamente necesario definir la o las especies a incorporar. En este sentido, es pertinente además, visualizar las posibilidades y conveniencia de trabajar con especies individuales o grupos de especies de tal manera que en el cálculo del tamaño de muestra se considere esta decisión. Ambas opciones son perfectamente abordables y entregarán funciones de calidad en la medida que se sigan los pasos de planificación, toma de datos y procesamiento de forma adecuada.

#### **Paso 2: Definición de áreas geográficas a incorporar en la muestra**

Conocidas las especies a incluir en la construcción de funciones, otro elemento de absoluta necesidad es la definición del área o zona geográfica en las que serían aplicadas las funciones resultantes de la construcción. Esto determinará la zona a incluir en el muestreo para la obtención de los datos básicos de terreno. En este contexto, en la medida que se cubra con el muestreo la totalidad de la zona en que se aplicarán las funciones, mejores serán los resultados estimativos de las funciones resultantes.

#### **Paso 3: Estimación del tamaño de la muestra por especie(s) o grupos de especies.**

Requiere de información de inventarios actuales o anteriores que permitan identificar la amplitud diamétrica y de altura de las masas boscosas, de manera de cubrir en el muestreo la totalidad de la amplitud.

Otra opción es realizar el cálculo de “n” en función del error de muestreo (variabilidad) o según restricciones de costo.

#### **Paso 4: Definición de la estrategia de muestreo en función del tamaño muestral establecido y el área geográfica a incorporar.**

Teniendo en consideración que en la mayoría de los casos se requiere que una función de volumen sea aplicable a extensas zonas de bosques se propone con un buen método de muestreo la utilización de conglomerados distribuidos en lo posible sistemáticamente dentro de la superficie a considerar en la construcción de la o las funciones de volumen.

Dentro de los conglomerados se podrán medir árboles de las distintas especies contempladas en la planificación correspondiente en un número que dependerá obviamente de la presencia de las especies buscadas y –en la medida en que se avance en los conglomerados- de las clases diamétricas que falten por completar en cada una de las especies en análisis.

El número de árboles muestra en cada punto de medición o conglomerado podrá ser proporcional al tamaño de la muestra definido para cada especie.

#### **Paso 5: Definición del Tipo de Muestreo a utilizar (destrutivo/no destructivo) y del equipamiento e instrumental a utilizar.**

La definición del tipo de muestreo a utilizar en términos de la forma en que se accede a las mediciones de los diámetros en altura de los árboles muestra, debe contemplar la definición en sí de acuerdo a la disponibilidad de los recursos técnicos (herramientas, equipos, instrumental y personal) y la capacitación de los profesionales, técnicos y colaboradores previo a la ejecución de la campaña de terreno.

#### **Paso 6: Preparación de la campaña de terreno.**

Considera la selección y capacitación del personal técnico y colaboradores locales que participarían en la toma de datos. Además, en el caso de utilizar instrumental de mayor sofisticación (por ejemplo dendrómetros láser), se requerirá de una capacitación específica acerca del uso de estos equipos.

#### **Paso 7: Elaboración de manual de instrucciones y formulario de toma de datos.**

Los formularios podrán ser en papel o directamente en “capturadores” digitales de datos, los que requerirán de una programación específica para estos efectos.

## 4.2 Etapa de captura de información en terreno

### Paso 1: Toma de Datos en terreno.

En general será necesario organizar la logística para la toma de datos de terreno en la que se considere transporte y estadía del personal técnico y colaboradores. Muchas veces es necesario considerar que el personal debe pernoctar en tiendas de campaña a fin de mejorar el rendimiento de toma de datos, debido a que en general las zonas de muestreo son de difícil acceso y se requiere invertir demasiado tiempo en traslados.

## 4.3 Etapa de procesamiento de información

### Paso 1: Traspaso de Formularios de Terreno

Una vez tomados los datos básicos en terreno se contará con el formulario, árbol por árbol, de los diámetros, espesores de corteza (en el caso de muestreo destructivo) y longitud de cada una de las secciones medidas. (Tabla 1).

**Tabla 1. Formulario de Terreno de un árbol muestra traspasado a una planilla electrónica para su procesamiento**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Nº Arbol	1								
2		DAP	10 cm								
3		Altura	12,37 m								
4											
5		Diámetro (cm)	Espeor corteza (mm)	Longitud sección (m)							
6		10,7	8,4	1,3							
7		8,4	7,3	1,5							
8		7,3	6	1,5							
9		6	5	1,5							
10		5	3,5	1,5							
11		3,5	2,6	1,5							
12		2,6	1,5	1,5							
13		1,5	0,4	1,5							
14		0,4	0	0,57							
15		0	0	0							
16		0	0	0							
17		0	0	0							

## Paso 2: Cálculo de volumen de árboles muestra.

Corresponde realizar el cálculo de volumen de cada uno de los árboles muestra, el que se realiza a través de la fórmula de Smalian. El procedimiento se puede hacer con una programación muy básica de una planilla electrónica (Tabla 2).

Tabla 2. Muestra del cálculo de volumen utilizando una planilla electrónica.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																		
2	hº Árbol	3																
3	DAP	10 cm																
4	Altura	12,57 m																
5	Volumen	0,0296 m³																
6																		
7	Variables	secciones del árbol muestra																
8	Sección	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
9	d0	10,7	8,4	7,3	6	5	3,5	2,6	1,5	0,4	0	0	0					
10	d1	8,4	7,3	6	5	3,5	2,6	1,5	0,4	0	0	0	0					
11	long	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	0,17	0	0	0					
12	volumen	0,0094	0,0079	0,0053	0,0036	0,0022	0,0011	0,0005	0,0003	0,0000	-	-	-					
13																		
14	hº Árbol	30																
15	DAP	18 cm																
16	Altura	15,45 m																
17	Volumen	0,1114 m³																
18																		
19	Variables	secciones del árbol muestra																
20	Sección	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
21	d0	20,3	14,9	13,2	11,3	10	8,4	6,4	4,8	3,3	2	0,3	0					
22	d1	14,9	13,2	11,3	10	8,4	6,4	4,8	3,3	2	0,3	0	0					
23	long	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	0,65	0					
24	volumen	0,0328	0,0233	0,0281	0,0137	0,0100	0,0066	0,0038	0,0020	0,0009	0,0003	0,0000	-					
25																		

## Paso 3:

Es conveniente luego, estructurar una simple Base de datos que contenga los valores tanto de las variables dependientes como de las independientes que luego serán utilizadas para los ajustes de regresión (Tabla 3).

Tabla 3. Base de Datos con los árboles muestra y sus variables asociadas previo al ajuste.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	ÁRBOL	DAP (cm)	Altura (m)	Volumen (m³)	ln (Volumen)	DAP²	DAP³	ln (DAP³)	1/(DAP³)						
4	1	10	12,4	0,0296	-3,5205	100	1.287,0	7,320444	0,140641						
5	2	8	9,3	0,0213	-3,7594	64	515,2	6,588897	0,154522						
6	3	16	13,2	0,0919	-2,3895	256	3.379,2	8,125394	0,123071						
7	4	10	10,7	0,0112	-4,4880	100	1.071,0	6,978214	0,143303						
8	5	12	13,2	0,0630	-2,7645	144	1.896,5	7,547755	0,132483						
9	6	14	15,7	0,1113	-2,1957	196	3.085,0	8,034320	0,124468						
10	7	10	12,5	0,0488	-3,1275	100	1.250,0	7,130899	0,140235						
11	8	10	8,8	0,0275	-3,5923	100	880,0	6,887553	0,145589						
12	9	8	7,4	0,0135	-4,3030	64	470,4	6,153583	0,162507						
13	10	14	15,0	0,0734	-2,6117	196	2.348,0	7,842294	0,127534						
14	11	14	12,3	0,0591	-2,8290	196	2.414,7	7,789338	0,126381						
15	12	10	10,0	0,0578	-2,8502	100	1.385,0	7,258485	0,138547						
16	13	14	13,3	0,0850	-2,4643	196	2.604,8	7,885127	0,127544						
17	14	22	15,8	0,1972	-1,6236	484	7.632,7	8,940184	0,111854						
18	15	16	15,3	0,1230	-2,0959	256	3.445,2	8,144157	0,122787						
19	16	10	11,1	0,0312	-3,4676	100	1.113,0	7,013016	0,142582						
20	17	10	11,0	0,0304	-3,4923	100	1.100,0	7,003065	0,142795						
21	18	16	15,0	0,0864	-2,4491	256	3.840,0	8,253138	0,121185						
22	19	14	12,8	0,0596	-2,8203	196	2.499,0	7,823646	0,127838						
23	20	14	14,4	0,0648	-2,7531	196	2.463,1	7,879872	0,126856						

#### Paso 4: Selección de Modelos de Regresión a utilizar en ajustes

Previo al ajuste es necesario seleccionar los modelos que se utilizarán para realizar los ajustes de regresión. Como se ha explicitado en el componente teórico de este documento, existen una serie de modelos clásicos ya probados, sin embargo es perfectamente posible agregar modelos específicos que de forma teórica o empírica puedan parecer apropiados al caso particular (Tabla 4).

Tabla 4. Muestra de Modelos seleccionados para la realización de ajustes de regresión.

MODELO 1	$V = a + b \text{ DAP}^2 H$
MODELO 2	$V = a + b \text{ DAP}^2 + c H$
MODELO 3	$\text{Ln } V = a + b \text{ Ln DAP}^2 H$
MODELO 4	$\text{Ln } V = a + b / \text{Ln}(\text{DAP}^2 H)$
Donde:	Donde:
V: Volumen	V: Volumen Total (m <sup>3</sup> )
D: Diámetro	D: Diámetro a 1.3 m (cm)
H: Altura	H: Altura Total (m)
Ln: Logaritmo	Ln: Logaritmo natural
a, b y c: Coeficientes	a, b y c: Coeficientes de Regresión

#### Paso 5: Verificación de supuestos de regresión

La verificación de los supuestos de regresión se puede realizar a través de métodos estadísticos paramétricos o no paramétricos, de acuerdo a las especificaciones explicitadas en los puntos anteriores de este documento.

#### Paso 6: Ajustes de Modelos de Regresión

Con los elementos anteriores (base de datos y modelos de regresión) es posible llevar a cabo los ajustes correspondientes ya sea en un software estadístico específico o en una planilla electrónica con análisis de datos (Tabla 5).

Tabla 5. Muestra de resultados de un ajuste de regresión.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Resumen										
2											
3	Estadísticos de la regresión										
4	Coefficiente de correlación múltiple	0,95612741									
5	Coefficiente de determinación R²	0,91417963									
6	R² ajustado	0,91122031									
7	Error típico	0,01147739									
8	Observaciones	31									
9											
10	ANÁLISIS DE VARIANZA										
11		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F					
12	Regresión	1	0,04069355	0,04069355	308,9151125	5,28E-17					
13	Residuos	29	0,00382019	0,00013173							
14	Total	30	0,04451374								
15											
16		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%		
17	Intercepción	0,00758711	0,00366338	2,07106692	0,047355635	9,47E-05	0,01508	9,47E-05	0,01508		
18	DAP2H	2,4837E-05	1,4131E-06	17,5739811	5,27517E-17	2,19E-05	2,8E-05	2,19E-05	2,77E-05		
19											

## Paso 7: Resumen de resultados de ajuste

Una vez realizados los ajustes, se procede a ordenar los resultados obtenidos para cada modelo a objeto de realizar la preselección y posterior selección de las funciones obtenidas (Tabla 6).

Tabla 6. Muestra de resumen de resultados de los ajustes realizados para los distintos modelos contemplados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3		Estadísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4				
4		a	0,007587115	-0,05341215	-0,773559324	3,696830177				
5		b	2,48369E-05	0,000328825	0,909739883	-49,50285618				
6		c		0,004916688						
7		t <sub>a</sub>	2,1	-3,8	-25,8	8,5				
8		t <sub>b</sub>	17,6	8,8	18,1	-17,1				
9		t <sub>c</sub>		3,4						
10		F <sub>maximal</sub>	308,9	157,1	325,8	283,5				
11		R²	0,9142	0,9183	0,9189	0,9101				
12		R² ajustado	0,9112	0,9128	0,9135	0,9070				
13		EEE	0,011	0,011	0,176	0,185				
14		ECM	18,26%	18,15%	19,33%	20,01%				
15										
16										



### Paso 8: Análisis de Residuos

Una buena medida para evaluar la bondad del ajuste y el comportamiento de las variables independientes dentro del modelo, es el análisis de los residuos resultantes (Valores reales – Valores estimados) de la aplicación de la función ajustada (Fig. 10).

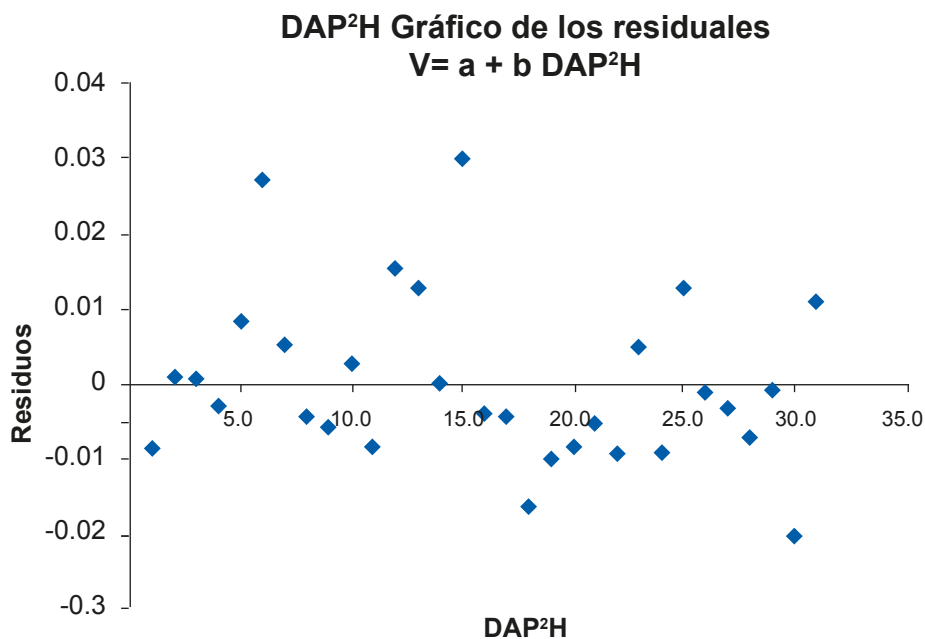


Fig. 10.  
Visualización gráfica de residuos (Volumen Real – Volumen Estimado) de una función ajustada.

### Paso 9: Preselección de Funciones

La preselección de funciones se realiza al interior de los subgrupos de modelos utilizados que poseen la misma variable dependiente. En el caso del ejemplo, se trataría de 2 subconjuntos, el primero con los modelos 1 y 2 cuya variable independiente es volumen (V) y el segundo con los modelos 3 y 4 cuya variable. En la preselección es posible utilizar los estadígrafos  $R^2$  ajustado y Error Estándar de Estimación (Tabla 7).

Tabla 7. Visualización de resultados asociados a modelos con igual variable dependiente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3		Estadísticos	Modelo 1	Modelo 2						
4		a	0.007587115	-0.05941215						
5		b	2.48569E-05	0.000326825						
6		c		0.004916888						
7		$t_a$	2.3	-3.6						
8		$t_b$	17.6	8.9						
9		$t_c$		3.4						
10		$F_{\text{análisis}}$	308.9	157.1						
11		$R^2$	0.9142	0.9183						
12		$R^2_{\text{ajustado}}$	0.9112	0.9123						
13		EEE	0.011	0.011						
14		ECM	18.26%	18.15%						
15										
16										

### Paso 10: Selección de la mejor función (modelos con igual variable dependiente)

La selección de la mejor función entre modelos de distinta variable dependiente se realiza utilizando el Error Cuadrático Medio (Tabla 8).

Tabla 8. Visualización de resultados asociados a modelos con distinta variable dependiente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3		Estadísticos	Modelo 1	Modelo 3						
4		a	0.007587115	-9.773559334						
5		b	2.48569E-05	0.009790883						
6		c								
7		$t_a$	2.3	-25.9						
8		$t_b$	17.6	18.1						
9		$t_c$								
10		$F_{\text{análisis}}$	308.9	325.9						
11		$R^2$	0.9142	0.9183						
12		$R^2_{\text{ajustado}}$	0.9112	0.9155						
13		EEE	0.011	0.175						
14		ECM	18.26%	19.33%						
15										
16										

### Paso 11: Selección de la mejor función (modelos con distinta variable dependiente)

La selección de la mejor función entre modelos de distinta variable dependiente se realiza utilizando el Error Cuadrático Medio (Fig. 11).

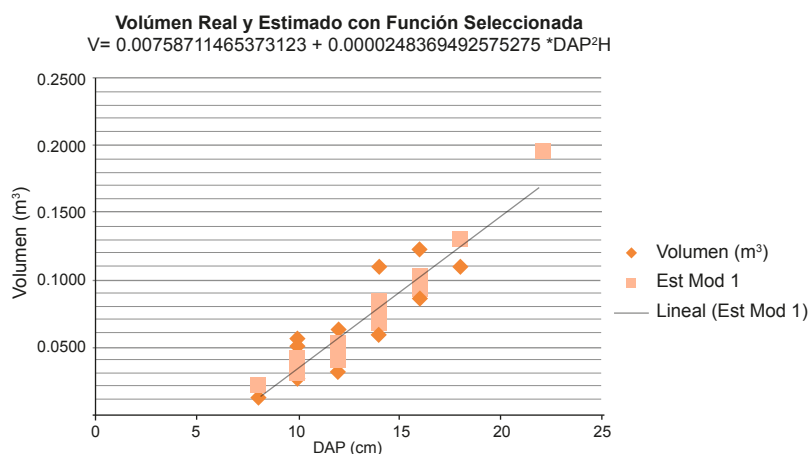


Fig. 11.  
Visualización gráfica del comportamiento de la función seleccionada.

### Paso 12: Validación de la función seleccionada.

La validación de las funciones seleccionadas se materializa utilizando una submuestra extraída de la muestra general obtenida en terreno. Esta submuestra que corresponde aproximadamente al 10% de la muestra total, no es utilizada en el proceso de ajuste y sólo se emplea en la comprobación de la calidad de las estimaciones de la función seleccionada utilizando pruebas estadísticas específicas. Algunos procedimientos más rigurosos en términos estadísticos se exponen en el punto relacionado con validación de funciones.

### Paso 13: Publicación y difusión de las funciones obtenidas.

Una de las principales debilidades que se encuentran en todo el proceso de construcción de funciones de volumen, tiene que ver con la reducida o restringida divulgación de los resultados de tal manera que las funciones seleccionadas con sus datos asociados puedan ser utilizadas por las instituciones y profesionales interesados.

En este contexto, se hace necesario que un programa de construcción de funciones dendrométricas en general, considere la publicación de las mismas ya sea en documentos físicos o de manera virtual de tal forma de garantizar la difusión y uso de los resultados obtenidos.

## 5. Ejemplo de construcción de funciones de volumen generales para especies individuales y grupos de especies

Se definió una superficie de 10.000 hectáreas de bosque del Tipo Forestal Siempreverde para la construcción de Funciones de Volumen de 12 especies pertenecientes al citado Tipo Forestal.

Las especies consideradas fueron las siguientes:

- *Fitzroya cupressoides*
- *Gevuina avellana*
- *Drimys winteri*
- *Nothofagus nitida*
- *Amomyrtus luma*
- *Podocarpus nobígena*
- *Saxegothaea conspicua*
- *Amomyrtus meli*
- *Aextoxicom punctatum*
- *Laurelia philippiana*
- *Weinmania trichosperma*
- *Eucryphia cordifolia*

La recolección de información se efectuó entre los meses de mayo y septiembre de 1998. La información recopilada consideró la medición de 11 especies del Tipo Forestal Siempreverde, además de Alerce (*Fitzroya cupressoides*) perteneciente al Tipo Forestal Alerce. Estas especies se dividieron en dos estados de desarrollo: Renoval y Adulto, formándose a partir de estas divisiones 23 grupos básicos de información. Las especies, estados de desarrollo y el tamaño muestral de cada agrupación se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Tamaños muestrales de especies consideradas en la construcción de funciones de volumen.

Nombre común	Nombre Científico	Estado de Desarrollo	Tamaño Muestral	Tamaño por Especie
Alerce	<i>Fitzroya cupressoides</i>	Adulto	25	98
		Rejuven	30	
Avellano	<i>Geranium avellana</i>	Adulto	32	32
Canelo	<i>Drimys winteri</i>	Adulto	96	150
		Rejuven	95	
Cogite de Chiloé	<i>Nothofagus nitida</i>	Adulto	77	190
		Rejuven	118	
Luma	<i>Amomyrtus luma</i>	Adulto	11	40
		Rejuven	30	
Melao de Hoja Puntaron	<i>Podocarpus nubigena</i>	Adulto	57	125
		Rejuven	66	
Melao Hoja Carta	<i>Sesuvium coccineum</i>	Adulto	27	90
		Rejuven	25	
Mela	<i>Amomyrtus meli</i>	Adulto	58	104
		Rejuven	46	
Oleado	<i>Antrocium punctatum</i>	Adulto	32	114
		Rejuven	92	
Sepa	<i>Laurelopsis philippiana</i>	Adulto	34	125
		Rejuven	39	
Tuao	<i>Wittmannia nuchaperna</i>	Adulto	42	108
		Rejuven	46	
Uña	<i>Escygnus cordifolia</i>	Adulto	12	35
		Rejuven	23	

La información obtenida en terreno para cada árbol-muestra correspondió a: DAP y espesor de corteza, Diámetro de Tocón y espesor de corteza, Diámetro a 4,2 m sobre el suelo, Diámetro al comienzo de copa, Diámetros cada 1/10 de la altura total del árbol, Altura Total, Altura comercial, Especie y Estado de desarrollo. Las mediciones de los árboles-muestra se realizaron con el instrumento LEDHA-GEO (Fig. 12), el cual fue diseñado para la medición e inspección de árboles en el bosque, empleando una moderna tecnología láser. El instrumento, permite medir variables como distancias, diámetros y ángulos, además de contar con 10 programas de medición. Posee una computadora integral que puede calcular parámetros del árbol por correlación de datos integrados por los diversos sensores incorporados, tales como reflectores, brújula electrónica y sensor angular.

El LEDHA-GEO se puede utilizar como un par de binoculares dejando retenidas las teclas para el posterior ingreso de datos. El instrumento provee la siguiente información del árbol:

- Azimut de un árbol, medición que realiza con la brújula electrónica interna.
- Distancia entre el instrumento y el fuste de un árbol, a través de reflectores.
- Altura del árbol, la que se realiza con la lectura en tres puntos del árbol: base, fuste y cima del árbol.
- Diámetro del árbol con precisión al centímetro.

La determinación del diámetro se realiza de acuerdo a una escala interna del instrumento, es decir, se posiciona el instrumento a una distancia determinada de un árbol, se ingresan los valores referenciales y combinado con el trabajo del láser interno, se obtiene el diámetro del árbol. La distancia máxima entre el árbol y el instrumento es de 100 m.

La cubicación de cada árbol-muestra se realizó utilizando la fórmula de Smalian. A través de esta expresión, se determinó el volumen sólido sin corteza de cada trozo generado por la medición de diámetros a distintas alturas y, por adición, el volumen total de cada árbol-muestra, previo descuento de la corteza, lo cual se realizó utilizando los valores de espesor de corteza medidos en el DAP y en el tocón de cada árbol y extrapolando las proporciones con respecto al diámetro a las siguientes secciones medidas. Durante este mismo procedimiento, se calcularon los volúmenes sólidos sin corteza hasta los diámetros límite de utilización de 8, 10, 15, 20 y 25 cm.

La utilización del dendrómetro láser LEDHAGEO en la obtención de la información de terreno, permite avanzar en la tecnificación de este componente, evitando el muestreo destructivo para el cálculo de volumen de los árboles-muestra, lo cual es significativamente importante cuando los tamaños muestrales son grandes.



Fig. 12.  
Vistas de Dendrómetro Láser LEDHA-GEO.

Otras características del muestreo realizado para la construcción de funciones de volumen son las siguientes:

- La selección de árboles muestra se realizó de forma aleatoria siguiendo fajas de acceso a la masa boscosa e identificando los árboles a medir.

- El registro de información se efectuó en formularios de papel debido a la dificultad que presentó el dendrómetro para programar el almacenamiento digital de la información.
- La cuadrilla de toma de datos estuvo compuesta por 4 personas: 2 técnicos a cargo de la toma de datos y 2 asistentes locales que además colaboraron como guías y prepararon los accesos a los sectores de medición con el uso de machetes.
- El rendimiento en la toma de datos en terreno fue de aproximadamente 25 árboles muestra por jornada.
- En total se recogieron antecedentes de 1.262 árboles muestra de las 12 especies consideradas en un periodo de 2 meses.

## 5.1 Funciones de Volumen por Especie

El ajuste de las funciones para cada especie, tanto para volumen total como para volumen a los distintos DLU, se realizó mediante análisis de regresión, utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios. Se probaron 10 modelos, recopilados de la literatura, los que consideran como variable dependiente tanto el volumen como el logaritmo natural del volumen, y como variables independientes el DAP, la altura total y combinaciones de estas variables de árbol. En lo que respecta al ajuste de la función agrupada, se siguió el mismo procedimiento de las funciones para especies individuales, realizándose el ajuste para el volumen total y los DLU 15 y 25 cm.

Se obtuvo funciones de volumen general para las 12 especies consideradas, tanto para la estimación del volumen total, como para estimar el volumen hasta los diámetros límite de utilización de 8, 10 y 15 cm. Además, se obtuvo funciones de volumen general para 8 especies nativas destinadas a la estimación del volumen hasta los DLU de 20 y 25 cm, excluyéndose las especies: Luma, Avellano, Mañío hembra y Ulmo. Estas no fueron incluidas debido a que no cumplían con las unidades mínimas para el ajuste de los modelos utilizados y en el caso de Mañío hembra (DLU=20 cm) y Meli (DLU=25 cm), no cumplían con los supuestos de regresión o no cumplieron con las dójimas aplicadas a sus coeficientes. En la Tabla 10 se presentan las funciones obtenidas para el volumen total. El detalle de las demás funciones, así como del proceso de selección, puede encontrarse en Contreras (1999) y Emanuelli (1999).

Tabla 10. Funciones de volumen seleccionadas para cada especie en Volumen Total.

SP	Función Seleccionada	n <sup>1</sup>	R <sup>2</sup> a	EEE <sup>3</sup>	ECM (%) <sup>4</sup>	D min (cm) <sup>5</sup>	D max (cm) <sup>6</sup>
FC	$V = 3,8 E-5(D^2H) - 6,5514 E-10(D^2H) + 7,20094 E-15(D^2H)^3$	96	0,9815	0,0657	20,19	6,50	63,00
GA	$V = 0,000028(D^2H)$	32	0,8816	0,0492	45,42	7,80	27,20
DW	$V = 0,000034(D^2H) - 8,7571 E-11(D^2H)^3$	185	0,9705	0,1896	23,90	6,80	77,00
NN	$V = 8,3273 E-6(D^2H) + 0,00054(D^2)$	195	0,9760	0,3398	22,00	6,60	88,20
AL	$V = 0,00004(D^2H) - 4,3235 E-10(D^2H)^3$	61	0,9818	0,0392	19,22	8,00	41,10
PN	$V = -0,0447 + 9,70 E-6(D^2H) + 0,000529(D^2)$	124	0,9735	0,1281	17,65	7,60	79,00
SC	$\ln V = -9,34971 + 2,064022 \ln D + 0,504382 \ln H$	92	0,9824	0,1503	22,32	8,10	58,00
AM	$\ln V = -8,994313 + 2,022983 \ln D + 0,474309 \ln H$	103	0,9778	0,1843	25,34	7,90	82,80
AP	$\ln V = -9,84084 + 2,19776 \ln D + 0,561577 \ln H$	109	0,9796	0,2153	26,78	6,50	88,50
LP	$V = 0,000025(D^2H) + 0,000169(D^2)$	122	0,9801	0,1514	19,19	8,10	69,00
WT	$V = 0,000039(D^2H) - 1,11124 E-10(D^2H)^3$	108	0,9755	0,2449	21,39	28,00	79,60
EC	$V = 0,00003(D^2H) - 3,9634 E-11(D^2H)^3$	35	0,9853	0,1632	23,54	10,30	98,00

Donde: D : Diámetro a 1,3 m sobre el suelo con corteza (cm)	V : Volumen sólido sin corteza total (m <sup>3</sup> )
H : Altura Total (m)	Ln : Logaritmo natural

1 El valor "n" corresponde al número de árboles-muestra utilizado en los ajustes.	variable dependiente de la función seleccionada.	5 La notación "D min" corresponde al DAP mínimo que incluye la muestra de cada especie.
2 La notación "R <sup>2</sup> a" corresponde al Coeficiente de Determinación Ajustado.	4 La abreviación "ECM" corresponde al Error Cuadrático Medio valor que se encuentra expresado en porcentaje del volumen medio de la muestra en cada especie.	6 La notación "D max" corresponde al DAP máximo que incluye la muestra de cada especie.
3 La abreviación "EEE" corresponde al Error Estándar de Estimación, el cual se encuentra expresado en unidades de la		

## 5.2 Función de Volumen de especies agrupadas

Paralelamente, se planteó la agrupación estadística de la mayor cantidad posible de especies y estados de desarrollo, para la posterior construcción de funciones de especies agrupadas para la estimación del volumen de árboles individuales hasta distintos diámetros límite de utilización (Fig. 13).

En lo que respecta al ajuste de la función agrupada, se siguió el mismo procedimiento de las funciones para especies individuales, realizándose el ajuste para el volumen total y los DLU 15 y 25 cm. La función seleccionada para la estimación del volumen total fue la siguiente:

$$V = 0.000\ 019 (D^2H) + 0.000\ 24 (D^2)$$

n: 1262

R<sup>2</sup> ajust.: 0.9649

EEE (m<sup>3</sup>): 0.2843

ECM (%): 30.61

DAP inferior (cm): 6.50

DAP superior (cm): 98.00



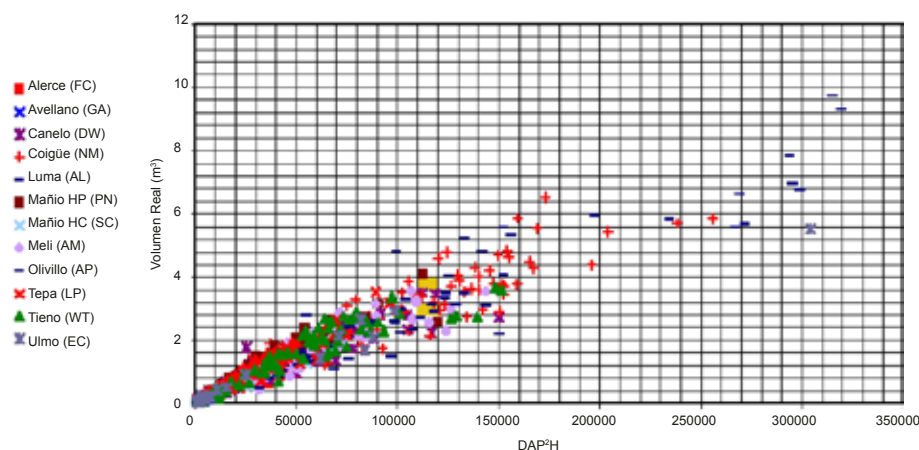


Fig. 13.

Visualización gráfica de los volúmenes en función del DAP²H para todas las especies incluidas en el ajuste de la función agrupada.

Aplicando pruebas estadísticas de igualdad de medias entre los valores estimados de funciones individuales por especie y agrupadas, con respecto a los valores reales de la muestra utilizada en el ajuste, se determinó que, desde el punto de vista estadístico, es similar utilizar para la estimación del volumen las funciones agrupadas (Volumen total y DLU 25cm) con respecto a las funciones de volumen por especie. La excepción la constituyó el Alerce en la estimación del volumen hasta un DLU 25 cm a partir de la función agrupada (Tabla 11).

Al comparar las estimaciones realizadas por las funciones para cada especie en particular y los resultados arrojados por las funciones agrupadas se comprobó que el error cuadrático medio y la diferencia agregada son más altos en las funciones agrupadas (4 a 6%, en promedio). La diferencia agregada se comporta más irregularmente para las distintas especies, obteniéndose valores de este estadígrafo incluso más bajos en la función agrupada en algunas especies en análisis.

**Tabla 11. Comparación estadística entre las funciones individuales por especie y la función agrupada para los volúmenes totales estimados.**

ESPECIE	F Muestral		F de Tabla	t - Student Muestral		t - Student de Tabla
	Función Individual	Función Agrupada		Función Individual	Función Agrupada	
Alerce	1,0971 ns	0,6581 ns	0,7123	-0,1440 ns	-1,7150 ns	1,9725
Avellano	1,3577 ns	1,0252 ns	1,0252	0,1479 ns	-1,1235 ns	1,9990
Canelo	1,0848 ns	0,8466*	0,7842	0,0402 ns	-0,5598 ns	1,9665
Coigüe de Chiloé	1,0684 ns	1,0400 ns	1,2671	-0,0896 ns	0,1783 ns	1,9661
Luma	1,1004 ns	0,8670*	0,6518	-0,0129 ns	-0,3720 ns	1,9801
Mañio Macho	1,0269 ns	1,3077 ns	1,3469	0,0006 ns	0,8514 ns	1,9697
Mañio Hembra	1,0299 ns	0,8503*	0,7070	0,0297 ns	-0,6566 ns	1,9732
Meli	1,0148 ns	0,8263*	0,7209	0,0715 ns	0,0715 ns	1,9717
Olivillo	1,0919 ns	1,1386 ns	1,3743	0,1037 ns	0,0321 ns	1,9710
Tepa	1,0791 ns	1,2766 ns	1,3502	0,0744 ns	0,6297 ns	1,9698
Tineo	1,1026 ns	0,9420 ns	0,7266	-0,2250 ns	-0,2250 ns	1,9712
Ulmo	1,0202 ns	0,5789*	0,5643	0,0641 ns	-0,3293 ns	1,9983

ns : no significativo  $\alpha = 0,05$

\* : significativo  $\alpha = 0,05$

Las funciones que agrupan una serie de especies que conviven en el Tipo Forestal Siempreverde, pueden ser de utilidad cuando se desea evaluar las existencias en forma rápida sin la necesidad de generar estimaciones muy precisas a nivel de especie. Esto es válido cuando el bosque a cubicar presenta una buena parte de las especies con que ha sido construida la función, de modo que los errores de estimación de las distintas especies y tamaños de los árboles-muestra se compensen entre sí y tiendan a los valores medios del volumen por unidad de superficie.

---

## 6. Recopilación y evaluación de funciones existentes

---

Previo a la elaboración de un programa de construcción de funciones de volumen u otra variable dendrométrica de interés, es pertinente realizar una recopilación y evaluación de las funciones existentes en las áreas o zonas de interés. Esto, con el objetivo de no replicar esfuerzos técnicos y económicos y hacer un uso apropiado de recursos normalmente escasos.

Para ello, es necesario considerar un procedimiento básico de registro y de comprobación de cálculo de funciones existentes de manera que en cada una de las funciones recopiladas se incluya la información asociada disponible, a objeto de que su uso sea más confiable o se tenga en consideración las probables limitaciones o restricciones de utilización.

Desde el punto de vista práctico, la recopilación de información de funciones debería considerar como mínimo los siguientes tipos:

- Funciones de Volumen de Árboles Individuales
- Funciones de Volumen agregado
- Funciones de Volumen por troza
- Funciones de Ahusamiento (Modelos Fustales)
- Funciones de Crecimiento
- Funciones de Biomasa
- Factores de Forma

## 6.1 Ejemplo práctico de Recopilación de Funciones Dendrométricas de Bosques Naturales en Chile.

La información necesaria en cada caso es la siguiente:

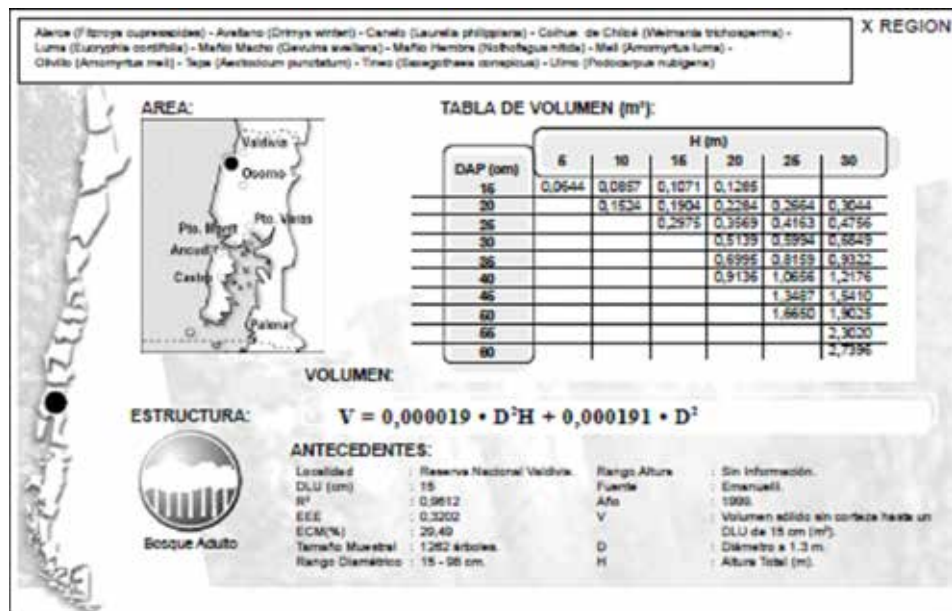
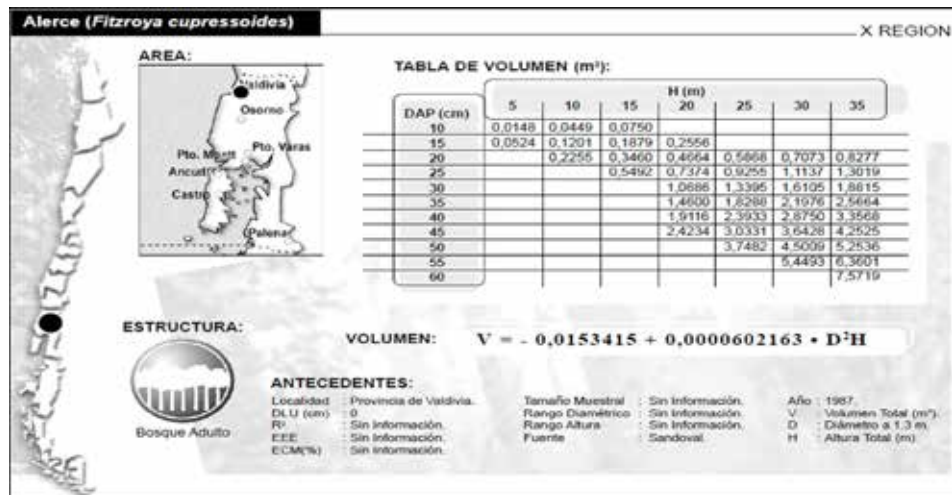
- Especie(s)
- Ubicación Geográfica de Construcción y Aplicación
- Tipo de Recurso Boscoso
- Localidad específica de toma de muestras
- Tamaño de la muestra
- Fecha de construcción
- Diámetro Límite de Utilización (DLU)
- Rango diamétrico de aplicación
- Rango de altura de aplicación
- Tipo de Volumen resultante (pe. con o sin corteza)
- Coeficiente de Determinación ( $R^2$ )
- Error Estándar de Estimación (EEE)
- Error Cuadrático Medio (ECM%)
- Fuente de Información
- Modelo de Regresión
- Tabla de Volumen asociada
- Descripción de Variable Independientes utilizadas

Dentro de la evaluación de las funciones se requiere la aplicación efectiva del modelo ajustado para los rangos definidos, los que muchas veces no se encuentran disponibles. Con esto es posible construir la Tabla de Volumen correspondiente y visualizar los resultados para distintos valores de cada una de las variables independientes que contenga el modelo.

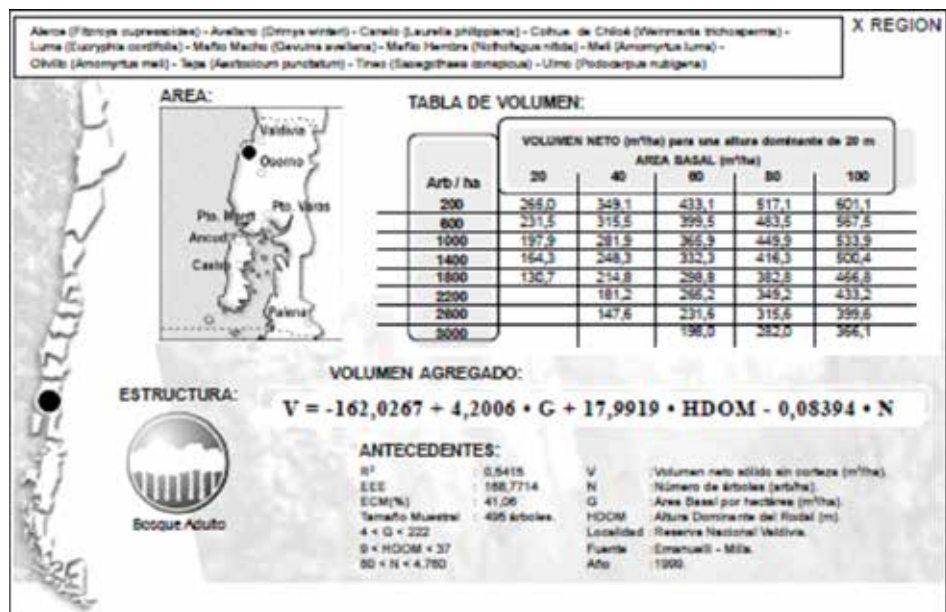
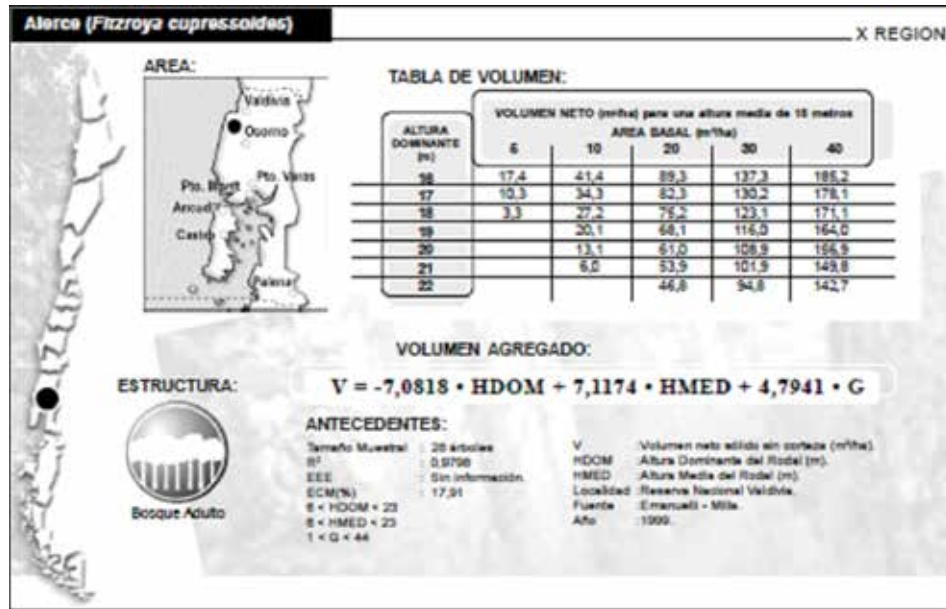
En este sentido, una de las sugerencias para sistematizar y disponibilizar de mejor manera las funciones, sería construir una Base de Datos que quede disponible en una WEB y en dónde se almacenen las funciones que se logren recopilar y posteriormente aquellas que se construyan.

En las siguientes figuras se muestra el resultado de una recopilación de funciones de estos distintos tipos realizada para especies nativas en Chile en el año 2000. Lo importante de esto, radica en la muestra de la información de que se dispone en cada caso, lo cual hará más o menos confiables los resultados emanados de su utilización.

## Funciones de Volumen de Arboles Individuales

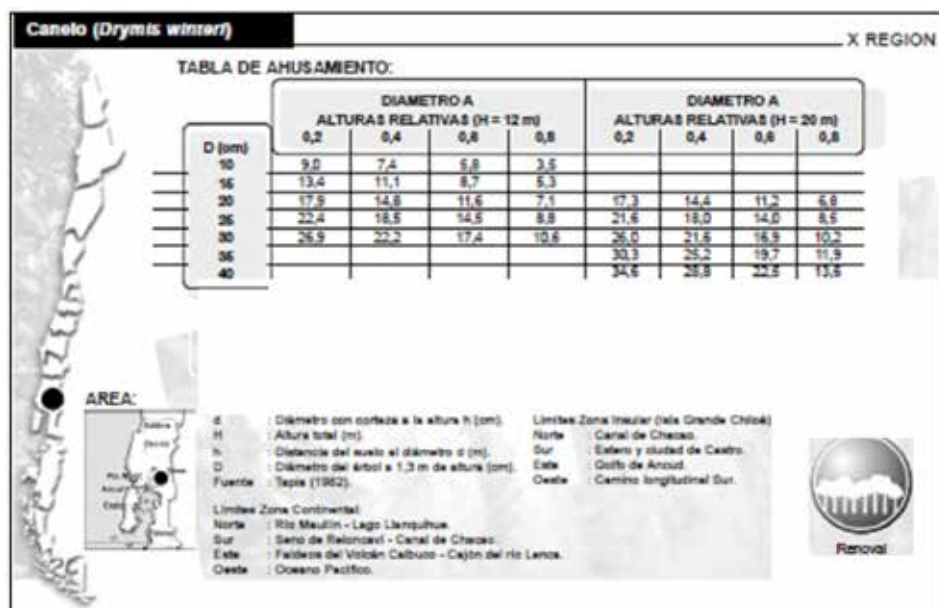
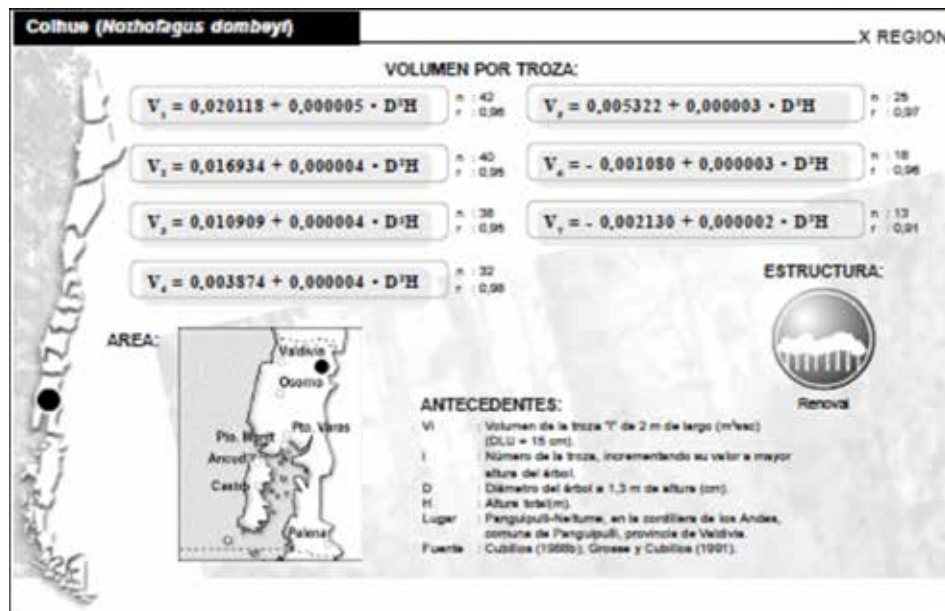


Funciones de Volumen agregado

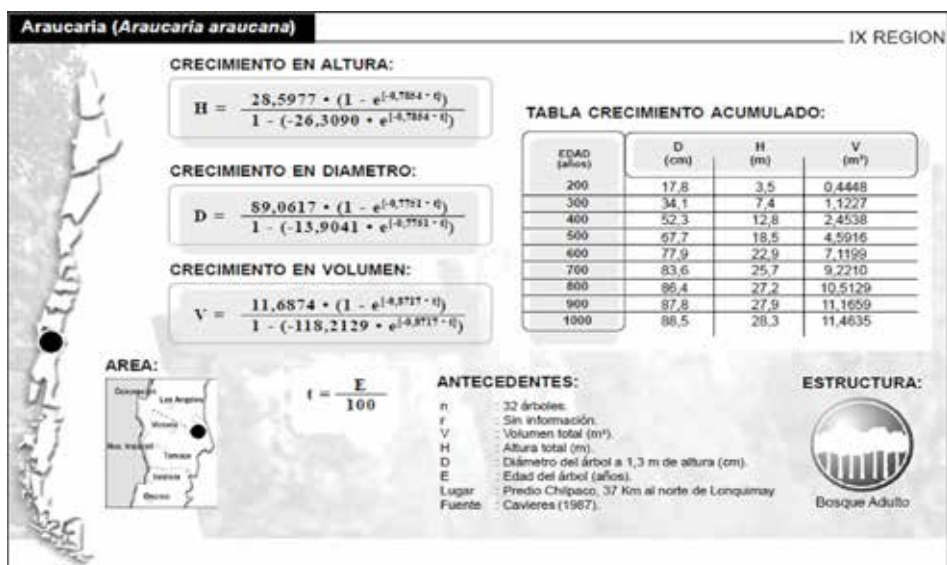
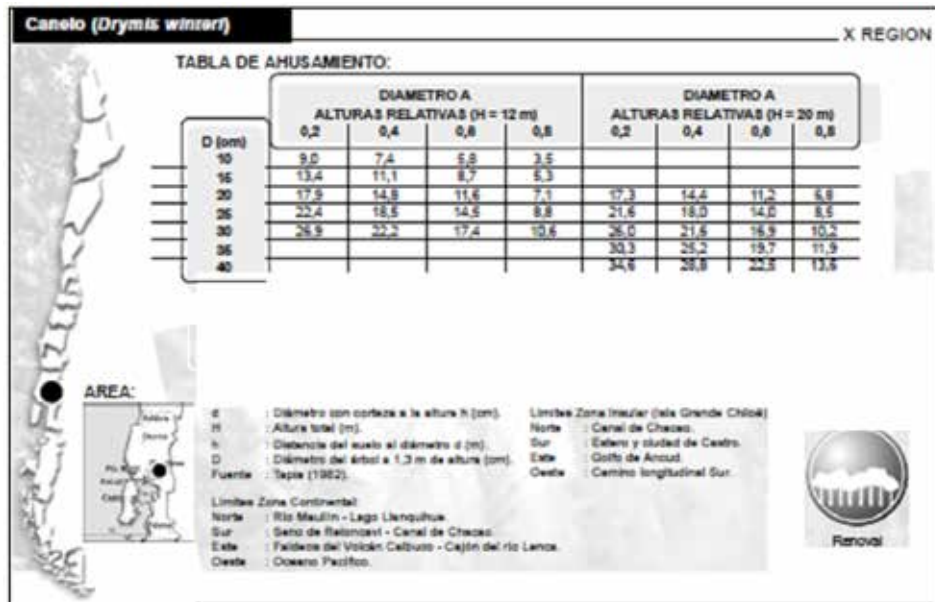




Función de Volumen por troza

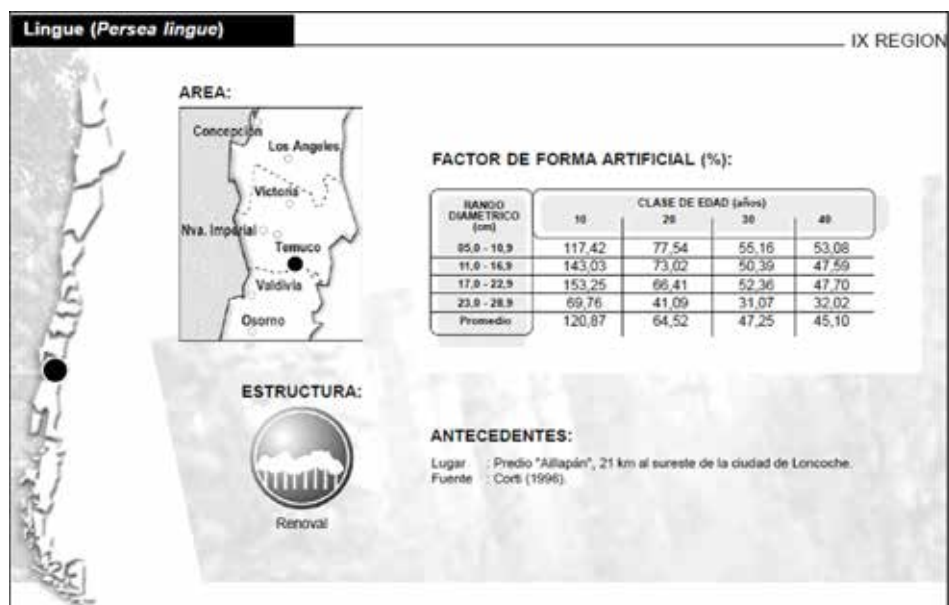
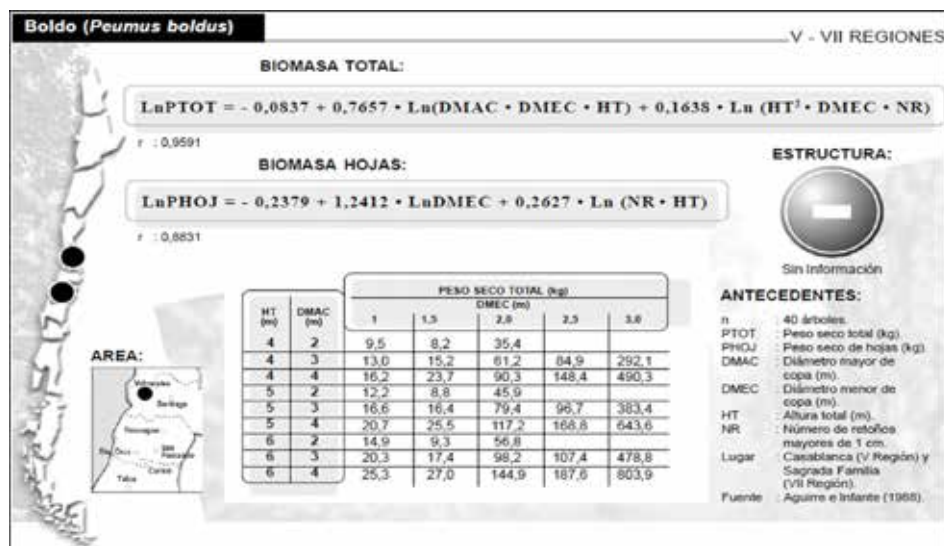


## Funciones de Ahusamiento





## Función de Biomasa



Como es posible apreciar en las imágenes anteriores, no siempre es posible encontrar la totalidad de los antecedentes necesarios para caracterizar adecuadamente una función dendrométrica. Sin embargo, la sola recolección y sistematización de las funciones y sus antecedentes asociados, permite generar un diagnóstico certero acerca de las necesidades de inclusión de especies, áreas geográficas y variables dendrométricas en un programa de mejoramiento de la disponibilidad de funciones para efectos de manejo de bosques y para estimar variables necesarias para los reportes REDD.

## 6.2 Recomendaciones para la recopilación de funciones de volumen, biomasa, modelos fustales, etc. en Centroamérica.

Algunas recomendaciones en este punto del documento pueden ser de interés para afinar una estrategia que permita recopilar la información existente en la región, a saber:

1. Identificar Centros de Estudios, Universidades, Institutos, Instituciones Públicas y/o Privadas, Bibliotecas Públicas y/o Privadas, Organismos Internacionales de Cooperación (FAO, PNUD, GTZ, BM, USDA, etc.), Programas y Proyectos de Cooperación técnica que eventualmente pudiesen contar con antecedentes relacionados con funciones dendrométricas o dasométricas para bosques de la región.
2. Constituir un equipo de investigación en cada país que revise la documentación existente y extraiga la totalidad de los antecedentes disponibles.
3. La información necesaria para cada función encontrada debería ser la siguiente:
  - Especie(s)
  - Ubicación Geográfica de Construcción y Aplicación
  - Tipo de Recurso Boscoso
  - Localidad específica de toma de muestras
  - Tamaño de la muestra
  - Fecha de construcción
  - Diámetro Límite de Utilización (DLU)
  - Rango diamétrico de aplicación
  - Rango de altura de aplicación
  - Tipo de Volumen resultante (pe. con o sin corteza)
  - Coeficiente de Determinación ( $R^2$ )

- Error Estándar de Estimación (EEE)
- Error Cuadrático Medio (ECM%)
- Fuente de Información
- Modelo de Regresión
- Tabla de Volumen asociada
- Descripción de Variable Independientes utilizadas

4. Constituir un equipo técnico centralizado dedicado a la sistematización y evaluación de la totalidad de las funciones encontradas en los distintos países. Este equipo sería el encargado de clasificar las funciones y de registrar sus características técnicas en una base de datos que permita poner a disposición cada uno de los modelos encontrados con las lógicas restricciones para su uso.
5. Una vez realizada la recopilación se deberá realizar un diagnóstico que permita visualizar los déficit a fin de planificar un Programa de Construcción de Funciones de Volumen u otras variables de interés en aquellas zonas geográficas, especies y variables que así lo ameriten y que sean de interés ya sea para el manejo de masas forestales como para la generación de datos básicos para aportar a la elaboración de los Reportes REDD.
6. Al utilizar funciones de volumen construidas con anterioridad es necesario tener en consideración la información asociada al área geográfica de construcción, la amplitud o rangos diamétricos y de altura especie(s) contempladas y errores de estimación correspondientes.
7. Una manera simple de verificar la precisión de las funciones existentes, dice relación con el proceso de validación que implica obtener una muestra de árboles en el mismo sector en que se construyó originalmente la función para realizar los cálculos de volumen a través de la función en evaluación y contrastarlos con los volúmenes reales.

## 7. Bibliografía

1. AVANZA, M.; MAZZA, S.; MARTÍNEZ, G. y L. GIMENEZ. 2002. Uso de transformaciones para el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, para modelos lineales. Facultad de Cs. Agrarias – UNNE; INTA- EEA Sombrierito. Corrientes - Argentina. 4<p. Consultado en marzo de 2011. Disponible en: <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2002/05-Agrarias/A-033.pdf>.
2. BENÍTEZ, H. 2009. Tiempo y rendimiento en el transporte para el abastecimiento de una cancha de trozado intermedia. Habilitación Profesional Ingeniería de Ejecución Forestal. Unidad Académica Los Ángeles, Universidad de Concepción. Los Ángeles, Chile. 37 p.
3. CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. FAO MONTES 1 (22).
4. CANCINO, J. 2006. Dendrometría Básica. Proyecto de Desarrollo de la Docencia, N° 04- 034. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. 171 p.
5. CAO, Q. V.; BURKHART, H. y T. MAX. 1980. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction for loblolly pine to any merchantable limit. Forest Science 26(1): 71-80
6. CASTRO, C. 1993. Funciones de volumen para globulus, nitens, regnans y delegatensis. CMPC. Santiago, Chile. 19p.
7. COSTAS, R., VERA, N.; LORÁN, D.; LÓPEZ CRISTÓBAL, L.; FOSCO, I. y J. GONZÁLEZ. 2006. Funciones de volumen para especies de bosque secundario de la Reserva Guaraní. Misiones (Argentina). Rev. FCA UNCuyo 38 (2): 49-57.
8. DRAKE, F. 1994. Estudio comparativo de costos en plantaciones forestales mecanizada y tradicional. En: Simposio de mecanización en silvicultura. . CMPC Forestal-Fundación Chile. Santiago. Enero de 1994.
9. EMANUELLI, P. 1999. Funciones generales de volumen para la Reserva Nacional Valdivia. Proyecto Manejo Sustentable del Bosque Nativo (CONAF-GTZ). Santiago, Chile. 22 p.
10. FREESE, P. 1960. Testing accuracy. Forest Science: 6 (2): 139-145.
11. GARCÍA, O. 1995. Apuntes de Mensura Forestal I. Estática. Catedra de Mesura Forestal. Instituto de Manejo. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile.
12. GUJARATI, D. 1992. Econometría Básica. McGraw-Hill. Latinoamericana S. A. Bogotá, Colombia. 597 p.
13. HARNETT, D. y J. MURPHY. 1987. Introducción al análisis estadístico. Addison-Wesley Iberoamericana. USA. 712 p.

14. JEREZ, M. y S. SOTOCA. 2010. Cátedra de Econometría II. Presentación Tema: Perturbaciones no esféricas. Universidad Complutense de Madrid. Marzo 2010. 24 p. Consultado en marzo de 2011. Disponible en: <http://www.ucm.es/info/ecocuan/mjm/ectr2mj/nosferi.pdf>.
15. LEIVA, J. 1999. Revisión del método de los mínimos cuadrados ordinarios (M. C. O.) en el análisis de la regresión y su utilización en la construcción de una función de volumen para Álamo negro (*Populus nigra*). Seminario de Título de Ingeniería de Ejecución Forestal. Unidad Académica Los Ángeles. Universidad de Concepción, Los Ángeles, Chile. 87 p.
16. MONTGOMERY, D. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Iberoamericana S.A. México. 589 p.
17. MUXICA, L. 1963. Análisis de regresión y correlación :simple, parcial y múltiple. Escuela de Economía y Administración, Universidad de Concepción,. Concepción, Chile. 89 p.
18. OSTLE, B. 1973. Estadística aplicada. Limusa-Wiley S. A. México. 629 p.
19. PÉREZ, M. 2004. Compatibilidad de funciones de volumen y ahusamiento para renovales de Roble en la Décima Región. Trabajo de Titulación Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
20. PRADO, J. y S. BARROS. 1989. Principios de silvicultura y manejo en Eucalyptus. Instituto Forestal - CORFO. Santiago, Chile. 199 p.
21. PRODAN, M.; PETERS, R.; COX F. y P. REAL. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible Proyecto IICA/GTZ. San José, Costa Rica, 561 p.
22. ROMAÑ DE LA VEGA, C.; RAMÍREZ, H. Y J. TREVIÑO. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 354 p.
23. SÁEZ, P. y C. SAN MARTÍN. 1998. Validación de funciones generales de volumen de *Eucalyptus nitens* para la zona de Mulchén. Habilitación Profesional Ingeniería de Ejecución Forestal. Unidad Académica Los Ángeles, Universidad de Concepción. Los Ángeles. 32 p.
24. SALAS, C.; REYES, M. y C. BASSABER. 2005. Medición de diámetros fustales con relascopio y forcípula finlandesa: efectos en la estimación de volumen. Bosque 26 (2): 81-90.
25. STEEL, R. y J. TORRIE . 1997. Bioestadística. Principios y Procedimientos. McGraw Hill, México, 622 p.
26. VALLEJOS, J. 1979. Un método para evaluar la exactitud de la función de volumen. Informe técnico N° 75. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 24 p.

Programa Regional REDD/CCAD-GIZ

Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Apartado Postal 755  
Bulevar, Orden de Malta, Edificio GIZ,  
Urbanización Santa Elena,  
Antiguo Cuscatlán, la Libertad  
El Salvador, C.A.

T +503 2121-5100  
F +503 2121-5101  
E [info@reddccadgiz.org](mailto:info@reddccadgiz.org)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)  
[www.reddccadgiz.org](http://www.reddccadgiz.org)





Programa Regional REDD/CCAD-GIZ

Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Apartado Postal 755  
Bulevar, Orden de Malta, Edificio GIZ,  
Urbanización Santa Elena,  
Antiguo Cuscatlán, la Libertad  
El Salvador, C.A.

T +503 2121-5100  
F +503 2121-5101  
E [info@reddccadgiz.org](mailto:info@reddccadgiz.org)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)  
[www.reddccadgiz.org](http://www.reddccadgiz.org)