

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**TABLAS DE VOLUMEN DE *EUCALYPTUS GLOBULUS* SSP. *GLOBULUS* AL  
SUR DEL RÍO NEGRO**

**por**

**Guillermo MORÁS LOYARTE**

Tesis presentada como uno de los requisitos para  
Obtener el título de *Magister* en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias Vegetales

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2010**

**Tesis aprobada por:**

---

**Oscar Santiago Vallejos Barra**

---

**Luis Soria**

---

**Carolina Sans**

**Fecha : Julio 2010**

**Autor:** \_\_\_\_\_  
**Guillermo Morás**

**Director:** \_\_\_\_\_  
**Gustavo Daniluk**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Gustavo Daniluk por guiarme en el desarrollo de la maestría.

A los docentes de las distintas materias cursadas por los conocimientos brindados.

A los docentes y funcionarios del Departamento de Producción Forestal y Tecnología de la Madera por el apoyo.

A Fernando Irisity por estar siempre.

A Gabriela, Agustín, Lucas, Fito, Olga, Tere, Blanca, Claudia y Laura por acompañarme siempre.

## TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>ANTECEDENTES</u> .....	4
2.1. VARIABLES DE PREDICCIÓN UTILIZADAS.....	7
2.2. MODELOS DE REGRESIÓN APLICADOS .....	8
2.3. MÉTODOS APLICADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS .....	11
2.4. MECANISMOS DE SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE ÁRBOLES .....	14
2.5. MECANISMOS DE VALIDACIÓN DE MODELOS.....	15
2.6. INDICADORES DE CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS .....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	20
3.1. LUGAR DE ESTUDIO .....	20
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS .....	20
3.2.1. <u>Características de los rodales</u> .....	20
3.2.2. <u>Suelo</u> .....	23
3.2.3. <u>Clima</u> .....	29
3.3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN .....	34
3.4. TRABAJO DE TERRENO.....	34
3.4.1. <u>Selección de individuos</u> .....	34
3.4.2. <u>Medición de árboles en pie</u> .....	34
3.4.3. <u>Mediciones del árbol volteado</u> .....	34
3.4.4. <u>Cubicación</u> .....	35
3.5. OBTENCIÓN DE LOS MODELOS A UTILIZAR EN LOS AJUSTES .....	35

3.6.	AJUSTE DE MODELOS.....	35
3.7.	SELECCIÓN DEL MODELO .....	36
3.8.	VALIDACIÓN .....	36
4.	<u>RESULTADOS</u> .....	37
4.1.	TARIFAS GENERALES PARA VOLUMEN TOTAL CON CORTEZA .....	37
4.1.1.	<u>Modelo VolRealTotal= <math>\beta_0 + \beta_1 * H * DAP^2 + \epsilon</math></u> .....	39
4.1.2.	<u>Modelo LnVolRealTotal= <math>\beta_0 + \beta_1 * \ln(H * DAP^2) + \epsilon</math></u> .....	43
4.1.3.	<u>Modelo VolRealTotal= <math>\beta_0 + \beta_1 * (H^2 * DAP) + \epsilon</math></u> .....	47
4.2.	TARIFAS VOLUMÉTRICAS GENERALES PARA VOLUMEN COMERCIAL CON CORTEZA.....	52
4.2.1.	<u>Modelo VolRealCom= <math>\beta_0 + \beta_1 * H * DAP^2 + \epsilon</math></u> .....	54
4.2.2.	<u>Modelo VolRealCom= <math>\beta_0 + \beta_1 * HCOM * DAP^2 + \epsilon</math></u> .....	59
4.2.3.	<u>Modelo LnVolRealCom= <math>\beta_0 + \beta_1 * \ln HCOM * DAP^2 + \epsilon</math></u> .....	64
4.3.	TARIFAS LOCALES DE VOLUMEN TOTAL Y COMERCIAL.....	69
5.	<u>DISCUSIÓN</u> .....	75
7.	<u>CONCLUSIONES</u> .....	77
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	78
9.	<u>ANEXO</u> .....	80

## TABLAS DE VOLUMEN EN *EUCALYPTUS GLOBULUS* SPP. *GLOBULUS* AL SUR DEL RÍO NEGRO

### RESUMEN

La cuantificación del volumen de madera en un bosque (inventario forestal) implica la realización de muchas mediciones de campo, lo que trae aparejado un importante esfuerzo en la recolección de los datos, haciendo que sea una actividad muy costosa. Las tablas de volumen individual permiten realizar el cálculo de madera de cada uno de los individuos en base a la medición de pocos y sencillos atributos de los árboles. El objetivo del trabajo fue elaborar tablas de volumen individual comercial y de volumen total, de aplicación local y regional, en plantaciones comerciales de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* ubicadas al sur del Uruguay. Para realizar el estudio se apearon 266 árboles. En cada uno de ellos se midió: diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetros a lo largo del fuste, para determinar el volumen real de madera individual utilizando la fórmula de Smalian. En base a los datos medidos, se determinaron cuales eran las variables más correlacionadas con la variable de interés (volumen total y volumen comercial) y con ellas se construyeron los modelos de regresión. Se seleccionaron los modelos que presentaron mayor coeficiente de determinación ajustado y menor error cuadrático medio, determinando para cada uno el tipo de sesgo y precisión. Con los modelos seleccionados se elaboraron tablas de aplicación general y local. El modelo que mejor ajuste presentó para volumen total con corteza es  $\text{LnVolRealTotal} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(H * \text{DAP}^2) + \varepsilon$  y para volumen comercial con corteza  $\text{VolRealCom} = \beta_0 + \beta_1 * (H * \text{DAP}^2) + \varepsilon$ . Al igual que para las tablas generales, los modelos de aplicación local de volumen comercial y volumen total con corteza, las variables independientes más comunes utilizadas son el diámetro a la altura del pecho y la altura del fuste.

**Palabras clave:** modelos de regresión forestales, modelos árboles individuales, funciones de volumen

**TABLES OF VOLUME IN *EUCALYPTUS GLOBULUS SPP. GLOBULUS*  
PLANTED IN THE SOUTH OF URUGUAY**

**SUMMARY**

Quantifying the volume of wood in a forest (forest inventory) involves making many measurements of field, which means a significant effort in collecting data, making it a very expensive activity. The individual volume tables allow the calculation of timber based on the measurement of a few simple attributes of the trees. The objective of this work was to develop individual volume tables for commercial wood and total wood, for local and regional applications of commercial plantations of *Eucalyptus globulus ssp. globulus* located in the south of Uruguay. During the process 266 trees were measured for diameter at breast height, total height and diameter along the stem. To determine the actual volume of individual wood the Smalian formula was used. Based on the measures, the variables better correlated with the variables of interest were identified and mathematical models were built. The models selected were the ones with the best coefficient of determination and the lowest mean square error, determined the type of bias and precision. Using selected models, tables of general application were developed. The best fit model for total volume with bark was  $\text{Ln VolRealTotal} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln} (\text{H} * \text{dap}^2) + \varepsilon$ , and for commercial volume with bark was  $\text{VolRealCom} = \beta_0 + \beta_1 * (\text{H} * \text{dap}^2) + \varepsilon$ . As for general tables, the models of local application and total commercial volume with bark diameter and height predominated as independent variables.

**KEY WORDS:** forestry regression models, , individual tree models, volume functions

## **1. INTRODUCCIÓN**

La cuantificación precisa del recurso maderero existente en un bosque, es un elemento central en la planificación forestal. Por tal motivo, la investigación a este respecto y, por ende, el desarrollo de métodos y modelos es tema de relevante importancia, pues permite propender a estimaciones más precisas y eficientes.

Como una forma de entender la relevancia que posee conocer el volumen maderable de un bosque, basta consignar la posición privilegiada que se puede alcanzar, en términos de competitividad, al poder determinar la cantidad de volumen a extraer anualmente de un bosque desde un punto de vista de un manejo forestal sustentable y para el abastecimiento de una planta industrial.

El volumen comercial de madera de un bosque es sumamente importante para cuantificar la cantidad de madera que puede ser cosechada y calcular cortas que sean sostenibles en el tiempo, para conservar el recurso renovable con una producción continua y estable como una contribución fundamental a la gestión forestal sostenible.

El volumen total, en cambio, es de fundamental determinación para realizar cálculos de biomasa para los mecanismos de desarrollo limpio.

La necesidad de llegar en mejores condiciones a los principales mercados, obliga a las empresas a desarrollar procesos cada vez más eficientes, que le permitan mantener la competitividad y asumir una línea de liderazgo en el sector.

En los ecosistemas de clima templado, los bosques del género Eucalyptus y Pinus presentan un alto significado económico, por lo que el conocimiento de su dinámica resulta ser de gran importancia para el desarrollo y preservación de estas especies dentro de los ecosistemas forestales y de los proyectos de forestación.

El volumen es la forma de expresión de la cantidad de madera en árboles y rodales más ampliamente utilizada a escala mundial. El volumen de madera contenido en un rodal puede considerarse como la suma de los volúmenes de los árboles en pie comprendidos en él. En consecuencia, una forma de acceder al conocimiento del

volumen de madera de un rodal es a través del conocimiento del volumen de sus árboles individuales. Una herramienta para determinar ese volumen son las Tablas de Volumen.

Desde su aparición, las tablas de volumen han constituido una herramienta importante a la hora de cuantificar la producción y rendimiento de una superficie en cuanto a volumen de madera, para una o más especies y, por lo tanto, útil para valorar económicamente un área boscosa. La primera tabla de volumen, concebida con una concepción moderna, fue construida en Europa a principios del siglo XIX, lo que indica que es una herramienta antigua.

La importancia de la función de volumen se debe a los altos costos y el tiempo que demandan la ejecución de un inventario, en el cual se deben de medir un número muy importante de árboles, haciendo que en algunos casos sea impracticable su realización. Mediante la estimación de una función matemática que relaciona la variable dependiente volumen con una o varias variables independientes de fácil medición como por ejemplo diámetro de la altura del pecho, altura total, altura comercial, factor de forma, es la manera que se puede materializar de modo más eficiente.

Las tablas de volumen son una presentación en forma tabular que estima el promedio de árboles en pie de distintas dimensiones, obtenido a partir de relaciones previamente establecidas, y para diferentes especies. Diámetro, altura y forma son las características del árbol más utilizadas para la predicción del volumen. Dependiendo de las variables independientes utilizadas, las tablas de volumen se clasifican en tablas locales, tablas estándar y tablas de forma. Una tabla local provee el volumen a partir del diámetro; una tabla estándar provee el volumen a partir del diámetro y una altura; y una tabla de forma provee el volumen a partir del diámetro, alguna altura y algún indicador de forma del tronco.

Los avances en los procedimientos de datos llevaron a que las tablas de volumen fueron reemplazadas por las ecuaciones de volumen, esto es, por modelos matemáticos capaces de representar el volumen medio de madera por árbol a partir de las variables independientes mencionadas. Sin embargo, el término tabla ha persistido como un término genérico, para expresar una tabla de volumen derivada de una ecuación de

volumen. Actualmente la mayoría de las una tablas de volumen que se utilizan son la expresión tabular de los valores de volumen predichos por una ecuación de volumen.

El presente estudio tiene como principal objetivo el desarrollo de tablas volumétricas en *Eucalyptus globulus ssp. globulus*, a partir de modelos matemáticos para la determinación del volumen de árboles individuales al sur del Río Negro con exactitud mayor al 70%.

Los objetivos particulares son:

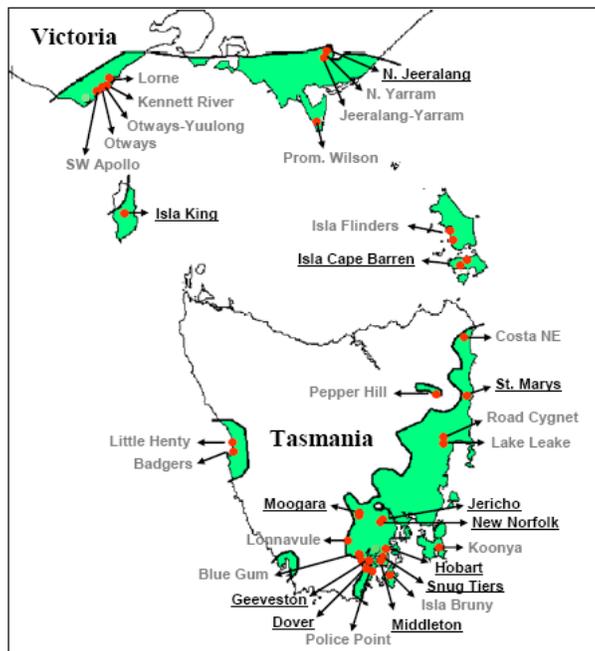
- Tablas volumétricas generales para volumen total con corteza
- Tablas volumétricas generales para volumen comercial con corteza
- Tablas volumétricas locales para volumen total con corteza
- Tablas volumétricas locales para volumen comercial con corteza

## **2. ANTECEDENTES**

La gran demanda en el mercado internacional para la producción de pulpa y papel de la madera de *Eucalyptus globulus* ha llevado a que esta especie sea la de mayor área plantada en Uruguay, con más de 250 mil hectáreas (MGAP, 2004). La mayor parte de las plantaciones con esta especie se ha realizado con semilla importada principalmente de Chile, España y Australia. En general dicha semilla no tiene mejoramiento genético o ha sido mejorada para condiciones diferentes a las presentes en nuestro país. Según los ensayos de orígenes el mejor origen de semilla es el proveniente de Jeeralang North, con mayor tasa de crecimiento, calidad sanitaria y rendimiento de pulpa por unidad de superficie (Balmelli *et al.*, 2006). Estas características puede llevar a que la inversión tenga una tasa interna de retorno de 17,6 % a los 8 años (Balmelli *et al.*, 2006).

En nuestro país la productividad del *Eucalyptus globulus* se ve limitada por diversos factores, principalmente en zonas con escasa influencia marítima, como ser utilización de fuentes de semillas inadecuadas y la susceptibilidad a varias enfermedades y plagas (Balmelli *et al.*, 2006). La importancia del manejo inicial de la plantación en cuanto a una correcta preparación del suelo, fertilización y control de malezas, son factores que influyen fuertemente para tener un alto vigor inicial que redunde en bajas tasas de mortalidad por efecto de factores ambientales (heladas) y bióticos (defoliación) (Balmelli *et al.*, 2006).

### Ilustración 1 Distribución natural de *Eucalyptus globulus*



Fuente: Balmelli *et al.*, 2006

A inicios del siglo pasado se construyen las primeras tablas de volumen por Heinrich Cotta, el cual desarrolló la tabla de volumen para *Fagus sylvatica*, concluyendo que el volumen individual depende de la altura (Prodan *et al.*, 1997). La introducción de los computadores personales facilitó en los últimos dos decenios la elaboración de tablas de volumen con mayor número de datos y variables analizadas. Los países (Chile, Brasil, U.S.A, España, Francia, Sudáfrica, Canadá, Rusia, Australia) con una larga tradición forestal utilizan actualmente diferentes sistemas para determinar con una gran exactitud el volumen a nivel del ecosistema forestal (Prodan *et al.*, 1997).

Prodan *et al.* (1997) consideran que la estimación del volumen es un problema relevante en la mensura forestal debido a la dificultad de su determinación directa mediante la cubicación de secciones del árbol, lo que hace conveniente contar con expresiones matemáticas que, basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitan estimar el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples.

Caillez (1980), define a las tarifas como la forma de determinar el volumen de árboles estimando el volumen a través de una tarifa, la cual puede ser presentada a través de una tabla, fórmula o gráfico. Se estima así el volumen de un árbol o de un conjunto de árboles en función de variables independientes más fáciles de medir que el propio volumen. Existe consenso a nivel mundial, que el diámetro a la altura del pecho medido a 1,30 metros desde el suelo (DAP), altura total, altura comercial y factor de forma para los árboles individuales, mientras que área basal por hectárea y altura promedio en el caso de rodales son las variables que generan mejores predicciones.

Prodan *et al.* (1997) distinguen a las tarifas como funciones que estiman el volumen solo en función de una variable (diámetro). Ocasionalmente se encuentra una división en las diferentes clases de altura. La elaboración de tarifas volumétricas supone que la altura del árbol permanece como una constante o que el rango de medición se divide en clases de altura.

Según Husch *et al.* (1982), la presentación de una Tabla de Volumen debe brindar información acerca de diferentes aspectos de su construcción y aplicación, cualquiera fuese el método utilizado en su construcción. Esa información comprende (Husch *et al.*, 1982):

- a) la especie o grupos de especies para las cuales es aplicable la tabla;
- b) el tipo de volumen predicho y unidades en que se expresa;
- c) las variables independientes utilizadas y sus unidades de medida;
- d) el nombre del autor,
- e) la fecha de elaboración;
- f) el número de árboles con que se construyó la tabla;
- g) la extensión o rango de cada variable independiente;
- h) la zona para la cual fue inicialmente desarrollada;
- i) el método para estimar el volumen de los árboles individuales,
- j) el método de construcción de la tabla,
- k) una medida apropiada de exactitud.

## 2.1. VARIABLES DE PREDICCIÓN UTILIZADAS

Las tablas fueron clasificadas según las variables de entrada (tablas locales, estándar y de forma) y el tipo de variable de predicción utilizada.

Según Bruce y Schumacher (1965), las variables independientes deben de reunir tres características para ser seleccionadas:

1. Ser fácilmente medible y con precisión.
2. Estar muy relacionada con la variable dependiente.
3. Ser indiferente en relación con las demás variables independientes que vayan a utilizarse.

Vargas (1999), citando a Caillez (1980), señala que las variables que se incluirán en la función de volumen deben ser fácil de medir y poco numerosas, que la correlación de éstas con la variable dependiente sea fuerte y que estén débilmente correlacionadas entre sí, para que el poder explicativo de una variable persista cuando las otras se introduzcan en el modelo. En general la mayoría de las funciones de volumen no utilizan más de tres variables explicativas, que normalmente son DAP, altura y factor de forma (Cuadro 1 y Cuadro 2), tal cual lo presentan Fucaraccio *et al.*, (1992) y Vargas (1999).

**Cuadro 1. Clasificación de las tablas por tipo y variable predictor**

<b>Tipo</b>	<b>VARIABLES Predictor</b>
Local	Diámetro
Estándar	Diámetro y altura total
	Diámetro y altura de fuste
	Diámetro e índice de sitio

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

**Cuadro 2 Variables explicativas más empleadas en los ajustes de funciones de volumen**

Variable	Tipos
Diámetro	DAP
	$DAP^2$
	$1/DAP$
Altura	H
	$H^2$
Altura - Diámetro	$H*DAP$
	$H*DAP^2$
	$H^2*DAP$

Fuente: Vargas (1999)

## 2.2. MODELOS DE REGRESIÓN APLICADOS

Los modelos de regresión empleados en el desarrollo de las tablas de volumen seleccionadas se clasificaron desde el punto de vista matemático y desde el punto de vista dasométrico.

El aspecto matemático hace referencia al tipo de modelo matemático empleado, mientras que el aspecto dasométrico hace referencia a la forma en que ese modelo es reconocido en la literatura forestal. Esta clasificación de los modelos se encuentra indicada la Cuadro 3 y Cuadro 4.

Las funciones basadas en una variable independiente (normalmente diámetro a la altura del pecho o área basal) se denominan “funciones locales de volumen”, mientras que las que emplean dos o más variables independientes se denominan “funciones generales de volumen” (Bruce y Schumacher 1965, Husch *et al.*, 1982, Caillez 1980).

Prodan *et al.*, (1997), indican que las funciones locales se deben aplicar a áreas limitadas donde la variabilidad en altura se considera mínima (depende del sitio), mientras que una función general es de aplicación más amplia, debido a que la relación diámetro – altura está explícita en el modelo, lo que facilita su uso para clases de edad y sitios diferentes.

Torres citado por Moraga (1997) aconseja que no se utilicen más de dos variables, y dentro de todas las posibles las más aconsejadas son la altura comercial o total y el diámetro a una altura fija (generalmente el DAP).

Para la construcción de una función de volumen se debe seleccionar una muestra de árboles que representen de la mejor manera las características del rodal. Caillez (1980) y Sorrentino (1990) aconsejan para rodales mono específicos y homogéneos y para tablas locales 50 a 100 árboles y para tablas generales 80 a 150 árboles. Para tablas repartidos en regiones extensas y heterogéneas entre 500 y varios miles de árboles. Se aconseja además que pertenezcan a diferentes clases diamétricas para lograr un mejor ajuste evitar que la mayoría de los árboles pertenezca a un reducido número de clases de diámetro.

Prodan *et al.*, (1997) consideran que por cuestiones de logística o económicas, se concentre la muestra en sectores de fácil acceso, descartando los individuos que crecen a orillas de camino ya que tienen en general hábitos de crecimiento diferentes a los que lo hacen dentro de la masa. Es práctica común obtener las mediciones en lugares en que se realiza la cosecha, lo que tiene el inconveniente de concentrar la muestra en rodales e individuos con ciertas características especiales. Ambas formas de recolección de datos tienden a limitar severamente la representatividad de la muestra, lo que pudiera conducir a sesgar los modelos ajustados y estimaciones erróneas de existencias cuando las funciones se utilizan en la práctica, ya que trataría de modelos con buen ajuste local.

**Cuadro 3 Clasificación matemática y dasométrica de los modelos**

Modelos	Clasificación	
	Regresión	Dasométrica
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \varepsilon$	Polinomial (grado 1)	Sin clasificar
$V = \beta_0 * DAP^2 + \varepsilon$	Polinomial (grado 2)	Bertkhouit
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon$		Kopezky – Gehrhardt
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon$		Dissescu-Meyer
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + c * DAP^2 + \varepsilon$		Hoernald-Kren
$V = \beta_0 * DAP^3 + \varepsilon$	Polinomial (grado 3)	Sin clasificar
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^3 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^3 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Variable combinada
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * HT + \varepsilon$		Variable combinada generalizada
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP * HT + \beta_3 * DAP^2 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 * HT + \beta_3 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 * HT + \beta_3 * DAP * HT^2 + \beta_4 * HT^2 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon$	Potencial	Sin clasificar
$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * HT^c + \varepsilon$	Potencial con variable combinada	Schumacher-Hall
$V = \beta_0 * (DAP^2 * HT)^{\beta_1} + \varepsilon$		Logarítmico sin intercepto y variable combinada
$V = \beta_0 + \beta_1 * \log DAP + \beta_2 * \log HT + \varepsilon$		Logarítmico sin intercepto
$V = (\beta_0 \text{ SITIO}^{\beta_1}) * ((DAP)^{\beta_2 (\text{Sitio})^{\beta_3}}) + \varepsilon$	Exponencial	Logarítmico sin intercepto
$\text{Ln } V = \beta_0 * \ln DAP + \beta_1 / DAP + \varepsilon$	Potencial	Brenac reducido

Fuente: Fucaraccio *et al.*, 1992

Cuadro 4 Otros modelos citados por la bibliografía

Modelo	Clasificación	
	Regresión	Dasométrica
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Spurr
$V = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP^2 * HT) + \varepsilon$	Potencial con variable combinada	Spurr
$V = \beta_0 + \beta_1 v DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^2 * HT + e * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada	Stoate
$V = DAP^2 * (\beta_0 + \beta_1 * DAP * HT) + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 3)	Ogaya
$V = DAP * (\beta_0 + \beta_1 * DAP * HT) + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Ogaya modificado
$V = \beta_0 * DAP^2 + \beta_1 * DAP^2 * HT + \beta_2 * DAP * HT^2 + \beta_3 * HT^2 + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Naslund
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP * HT + \beta_4 * DAP^2 * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Meyer
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^2 * HT + \beta_4 * DAP * HT^2 + f * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Meyer
$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln DAP + \beta_2 * 1/DAP + \varepsilon$	Logarítmico	Brenac

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

### 2.3. MÉTODOS APLICADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para la construcción de funciones de volumen se acude habitualmente a métodos estadísticos para poder estimar el volumen total, el volumen comercial o el volumen con o sin corteza.

El método de los mínimos cuadrados es el más utilizado para ajustar un modelo de regresión. Es el mecanismo de estimación que más se utiliza, particularmente sin ponderación, esto es, sin contemplar el comportamiento de la varianza del volumen. Como mecanismo menos utilizado aparecen los métodos no lineales y los métodos gráficos (Cuadro 5) por haber sido reemplazados por métodos avanzados de procesamiento de mayor precisión.

**Cuadro 5 Clasificación según el método de estimación de parámetros**

<b>Métodos Aplicados</b>	
Métodos de Mínimos Cuadrados	Sin ponderación
	Con ponderación
	Paso a paso
Métodos no lineales	
Métodos gráficos	

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

El método de mínimos cuadrados es la curva que se obtiene de ajustar los datos con un método de regresión entre el volumen y variables independientes que da la ecuación más verosímil, y por consiguiente, su localización más probable. Así la curva que se ajusta es aquella en que sea menor la suma de los residuos elevados al cuadrado, lo que permitirá un error lo más pequeño posible (Bruce y Schumacher 1965).

El modelo de regresión se basa en varios supuestos (Steel y Torrie 1985): Normalidad. El modelo de regresión lineal supone que cada perturbación o error está distribuido normalmente con un valor esperado igual a cero, una varianza constante y que no están correlacionadas. Como consecuencia, con el supuesto de normalidad se plantea que para dos variables con distribución normal, además de no estar correlacionadas, estas se distribuyen en forma independiente. Para detectar la presencia o ausencia de normalidad en la distribución de las perturbaciones se puede hacer en forma visual graficando las perturbaciones o por el Test Shapiro – Wilks que supone distribuciones independientes para las variables aleatorias. Para los problemas de residuos atípicos y de amplias colas existen varios métodos: adquirir más información o transformar los datos para conseguir normalidad.

No multicolinealidad entre las variables explicativas. La multicolinealidad es la dificultad obtener estimaciones de los coeficientes con pequeños errores estándar. Este problema se presenta frecuentemente en análisis de tipo empírico y presenta problemas de estimación suficientemente importantes para garantizar que sea considerado como una violación al modelo clásico de regresión lineal. Esto es una característica de la muestra y no de la población, siendo un problema de grado y no de tipo. De existir una

perfecta colinealidad entre las variables explicativas, sus coeficientes son indeterminados y los errores estándar infinitos. Si la colinealidad es alta, pero no perfecta, la estimación de coeficientes es posible, pero los errores estándar tienden a ser grandes y los valores poblacionales de los coeficientes no pueden estimarse en forma precisa. El signo más claro de la existencia de multicolinealidad es un coeficiente de determinación muy alto, pero ninguno de los coeficientes de regresión es estadísticamente significativo, considerando la prueba t. Otra manera de analizar esta situación es a través de la matriz de correlación, la cual nos muestra la existencia o no de una alta correlación entre dos variables independientes que se utilicen. De existir es debido a que se presenta multicolinealidad entre las variables. Para ello se deben de omitir una variable altamente colineal, transformar la información u obtener nueva información.

Homocedasticidad o igual varianza de las perturbaciones. El otro supuesto crítico del modelo de regresión es que los términos de perturbación tienen todos la misma varianza (homocedasticidad). Si no se cumple, se presenta el fenómeno de heterocedasticidad, entonces los estimadores no son de varianza mínima y por lo tanto no eficientes. Para su cálculo se han creado algunos métodos informales y de aproximación, los cuales generalmente examinan los residuos obtenidos para buscar en ellos patrones sistemáticos. El test de Bartlett, detecta la presencia o ausencia de heterocedasticidad y si esta es significativa. De presentarse, el método más directo para resolver el problema consiste en utilizar la técnica de mínimos cuadrados ponderados, que minimiza las perturbaciones con valores externos ponderándolas en proporción inversa a sus varianzas. Se puede solucionar el problema a través de transformaciones logarítmicas. Torres (1998) citando a Cunia (1964), Caillez (1980) y Meng y Tsai (1986) indica que el supuesto de homocedasticidad generalmente no se cumple en el caso de la construcción de funciones de volumen, debido a que la varianza del volumen aumenta a medida que lo hace el tamaño de los árboles. Esto se soluciona con transformaciones logarítmicas, raíces de la variable dependiente o sino a través del cálculo de los coeficientes de regresión del modelo utilizando el método de mínimos cuadrados ponderados.

## 2.4. MECANISMOS DE SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE ÁRBOLES

Coincide con la bibliografía analizada, Fucaraccio *et al.* (1992), donde el criterio más utilizado para llevar a cabo la selección de los árboles muestra es al azar, por clase de diámetro o por clase de diámetro y altura, según se muestra en la Cuadro 6.

**Cuadro 6 Métodos de selección de árboles muestra**

Método de muestreo
Individuos al azar
Por clase de diámetro
Por clase de área basal
Por clase de diámetro y altura
Por clase de diámetro, altura y edad
Por árbol tipo

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

## **2.5. MECANISMOS DE VALIDACIÓN DE MODELOS**

Una vez seleccionados los modelos es necesario validarlo, realizar algún proceso para determinar si el modelo verdaderamente representa de un modo u otro la realidad (Alder, 1980).

Al respecto, se pueden considerar dos alternativas:

Autovalidación. Los datos usados para la validación del modelo fueron seleccionados entre los que se utilizaron para estimar sus parámetros.

Validación independiente. Los datos usados para la validación del modelo no forman parte de los que se utilizaron para estimar sus parámetros.

El esfuerzo puesto en los procesos de validación de los modelos, de ninguna manera es superfluo. Así se pueden demostrar debilidades en el comportamiento de un modelo en particular, lo cual conducirá a mejorar la estructura o a la necesidad de recolectar más datos de campo (Alder, 1980).

En el proceso de validación, lo primero es determinar la naturaleza del sesgo, mediante una prueba t – student. Lo segundo, corresponde aplicar el test de Freese (1960) para evaluar la exactitud del modelo.

## **2.6. INDICADORES DE CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS**

Los indicadores se utilizan para evaluar la calidad del ajuste alcanzado por los modelos y para la validación de los modelos (Cuadro 7).

Gujarati (1992), citado por Torres (1998), menciona que una prueba de significancia es un procedimiento mediante el cual se utilizan los resultados de la muestra para corroborar la veracidad o falsedad de una hipótesis. La prueba de significancia consiste en utilizar un estadístico de prueba (estimador) y la distribución muestral de este bajo la hipótesis nula ( $H_0$ ). La decisión de aceptar o rechazar  $H_0$  se toma sobre la base del valor del estadístico obtenido a partir de los datos disponibles.

El estadístico es significativo si el valor del estimador se encuentra en la región crítica o de rechazo, y que es estadísticamente no significativo si el valor del estimador se encuentra en la región de aceptación. Por lo general se selecciona un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0,05 o 0,01 y la región crítica de acuerdo con eso. Existe una ayuda en la toma de decisiones a través de una aproximación denominada valor p, el cual es definido como el nivel más bajo de significancia en el cual el valor observado del estadístico de prueba es significativo.

**Cuadro 7 Indicadores de calidad del ajuste**

<b>Indicadores</b>
Coeficiente de determinación
Prueba F
Prueba t
ANARE (análisis de residuales)
ESE
Análisis de varianza
Error estándar
Test de Durbin Watson
Coeficiente de variación de los residuos
Desviación estándar residual
Coeficiente de determinación del error
Porcentaje desviación estándar residual
Coeficiente de regresión parcial
Correlación por rangos de Spearman
Desvíos
Error normal
Error absoluto
Error medio absoluto
Desvío estándar de residuales
Residuo Promedio
Desvíos absolutos
Desvíos promedios
Cuadrado medio residual

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

La teoría de las pruebas de hipótesis se centra en desarrollar procedimientos para decidir si aceptar o rechazar la hipótesis nula. Para desarrollar estos procedimientos

existen dos enfoques mutuamente complementarios: el de intervalo de confianza y prueba de significancia.

La decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula se toma sobre la base del valor del estadístico obtenido a partir de los datos recolectados. Mientras que el nivel de significancia, es la probabilidad que el valor observado del estadístico de prueba este en la región crítica o de rechazo, y representa la cantidad de evidencia en contra de  $H_0$ , encontrada en la muestra bajo el supuesto de que la hipótesis nula es verdadera.

El procedimiento para las pruebas de hipótesis siguen los siguientes pasos:

1. Establecer la hipótesis nula ( $H_0$ ).
2. Seleccionar una hipótesis alternativa ( $H_1$ ).
3. Seleccionar un nivel de significancia de tamaño  $\alpha$ .
4. Seleccionar el estadístico de prueba apropiado y establecer la región crítico. (Si la decisión se va a basar en un valor p no es necesario establecer la región crítica).
5. Calcular el valor del estadístico de prueba de los datos muestrales.
6. Decidir: rechazar  $H_0$  si el estadístico de prueba tiene un valor en la región crítica (o si el valor calculado p es menor o igual que el nivel de significancia deseado  $\alpha$ ); de otra forma no rechazar  $H_0$ .

La Prueba t sirve para determinar si el parámetro estimado ( $\hat{\beta}_i$ ) es significativamente distinto de un cierto valor poblacional  $\beta$  o determinar la influencia de la variable explicativa sobre la variable dependiente.

Las hipótesis son:

- $H_0: \beta_i = 0$
- $H_1: \beta_i \neq 0$

La decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula se toma con relación al valor que toma el estadístico obtenido a partir de los datos de la muestra.

Si el valor del estadístico de prueba cae en la región de rechazo, se dice que éste es estadísticamente significativo, con lo que se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa.

La prueba F permite evaluar la confiabilidad global del modelo obtenido, se prueba si la variabilidad de la variable dependiente  $Y$ , es explicada significativamente por la(s) variable(s) independiente(s) del modelo de regresión a un determinado nivel de significancia. Se determina si el vector de parámetros estimados es significativamente distinto de un vector de parámetros poblacionales.

Las hipótesis son:

- $H_0: B = 0$
- $H_1: B \neq 0$

La prueba de Bartlett se utiliza para detectar homogeneidad de las varianzas entre las perturbaciones.

La prueba Shapiro – Wilks proporciona una medida de la presencia o no de distribución normal de las perturbaciones a través de la recta generada al graficar la función de distribución acumulada con los residuos o perturbaciones, donde la hipótesis nula indica que las perturbaciones se distribuyen en forma normal y que la región crítica se encuentra bajo el valor del estadístico  $w$  (Cid *et al.*, 1990, citado por Torres 1998).

Torres (1998) citando a Gujarati (1992) considera que dentro de las pruebas para seleccionar cual es el modelo que mejor representa la estimación, el más importante es el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y es muy utilizada para medir la bondad del ajuste de una línea de regresión. El coeficiente de determinación mide la proporción de la variación total en  $Y$  explicada por el modelo de regresión.

El mismo varía entre 0 y 1, cuando esto último sucede se tendría un ajuste perfecto, lo que rara veces sucede. Se presentan generalmente perturbaciones positivas y negativas y lo ideal es que estas sean lo más pequeñas posible.

También se utiliza el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) para el caso de regresiones múltiples y mide cuanto se ajusta la línea de regresión a los datos.

Otra forma de medir el ajuste es a través del error estándar de estimación, que es la desviación estándar de los valores Y con respecto a la línea de regresión estimada y que se utiliza con frecuencia como una medida que resume la bondad del ajuste de la línea de regresión estimada.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. LUGAR DE ESTUDIO**

La zona de estudio fue al sur del Río Negro, principalmente al sur del Uruguay, abarcando los departamentos de San José, Montevideo, Canelones, Lavalleja y Rocha.

#### **3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS**

##### **3.2.1. Características de los rodales**

La especie en estudio fue *Eucalyptus globulus ssp. globulus*, midiéndose un total de 266 árboles, de origen seminal en la mayoría de los casos, salvo en dos que son de origen de rebrotes. El estado sanitario de las plantaciones era bueno, no evidenciándose ninguna enfermedad importante en los individuos.

Los individuos que conformaban las diferentes plantaciones eran coetáneos, con edades que iban de 6 a 11 años, predominando plantaciones de 9 años. Las densidades de los bosques son en todos los casos para destinos para la producción de pasta de celulosa, con densidades de 1111 a 1600 árboles por hectáreas (Cuadro 9), con espaciamientos diversos, predominando 4 metros por 2 metros y 3 metros por 2 metros.

El volumen por hectárea que tenían los rodales al momento de la medición se encontraban entre 50 y 200 metros cúbicos por hectárea. El volumen total con corteza por árbol promedio fue de 0,13 metros cúbicos con un máximo, con máximo de 0,73 metros cúbicos y un mínimo de 0,00039 metros cúbicos. El diámetro a la altura del pecho promedio era de 14,31 cm con un máximo de 30 cm y un mínimo de 3,2 cm. La altura promedio fue de 14,82 m con máximo de 26,59 m y un mínimo de 5,26 m.

Las altitudes sobre el nivel del mar donde se encontraban las plantaciones iban desde 20 metros a casi 300 metros ( Cuadro 8).

**Cuadro 8 Ubicación de los establecimientos**

Establecimiento	Latitud	Longitud	Altura sobre el nivel del mar (m)
San José (Palmares de San Gregorio)	34° 41' 09" S	56° 45' 97" W	20
Montevideo (Mailhos)	34° 49' 53" S	56° 23' 30" W	27
Canelones 1 (Soca S.A)	34° 39' 35" S	55° 36' 07" W	86
Canelones 2 (Puig)	34° 39' 52" S	55° 34' 05" W	57
Canelones 3 (Sauce Solo)	34° 27' 03" S	55° 34' 40" W	65
Lavalleja 1 (Canteras Ancap)	34° 25' 37" S	55° 16' 10" W	179
Lavalleja 2 (Mi Refugio S.A)	34° 12' 53" S	55° 17' 11" W	186
Lavalleja 3 (Pucanix)	34° 05' 53" S	55° 10' 44" W	160
Lavalleja 4 (Paso de los troncos)	34° 07' 12" S	54° 56' 46" W	195
Lavalleja 5 (Barriga Negra)	34° 14' 45" S	55° 09' 51" W	175
Lavalleja 6 (María Albina)	33° 35' 07" S	54° 45' 32" W	216
Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	34° 25' 21" S	55° 08' 33" W	267
Rocha (India Muerta)	34° 02' 17" S	54° 13' 08" W	89

**Cuadro 9 Características silvícolas según establecimiento**

Establecimiento	Estado Silvicultural	Volumen (m <sup>3</sup> /ha)	N/ha
San José (Palmares de San Gregorio)	Fustal	156,7	1429
Montevideo (Mailhos)	Fustal	103,0	1667
Canelones 1 (Soca S.A)	Fustal	137,9	1667
Canelones 2 (Puig)	Rebrote	174,6	1250
Canelones 3 (Sauce Solo)	Fustal	191,6	1111
Lavalleja 1 (Canteras Ancap)	Fustal	48,9	1667
Lavalleja 2 (Mi Refugio S.A)	Fustal	133,1	1250
Lavalleja 3 (Pucanix)	Fustal	188,6	1667
Lavalleja 4 (Paso de los troncos)	Fustal	118,9	1667
Lavalleja 5 (Barriga Negra)	Fustal	148,5	1667
Lavalleja 6 (María Albina)	Fustal	60,7	1111
Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	Rebrote	79,2	1667
Rocha (India Muerta)	Fustal	84,9	1250

### 3.2.2. Suelo

La gran mayoría de los suelos donde se encontraban las plantaciones son de prioridad forestal, predominando los suelos 2.12 y 2.21. El detalle de los diferentes suelos según establecimiento se presenta en la Cuadro 10.

**Cuadro 10 Tipos de suelos CONEAT según establecimiento**

ESTABLECIMIENTO	TIPO DE SUELO CONEAT
Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	2.12
Lavalleja 4 (Paso de los troncos)	2.12
Lavalleja 1 (Canteras Ancap)	2.12
Canelones 3 (Sauce Solo)	9.42
Canelones 1 (Soca S.A)	5.02b
Canelones 2 (Puig)	10.8a
Lavalleja 5 (Barriga Negra)	2.11.a
San José (Palmares de San Gregorio)	07.1
Lavalleja 6 (María Albina)	2.21
Rocha (India Muerta)	2.21
Lavalleja 3 (Pucanix)	2.11a
Montevideo (Mailhos)	10.06b
Lavalleja 2 (Mi Refugio S.A)	2.12

Los suelos 2.21 se caracterizan por encontrarse donde el relieve es de colinas, con interfluvios convexos y pendientes entre 6 y 12%. Los suelos son Brunosoles Lúvicos (Praderas Pardas máximas), francos y Argisoles Subéutricos Melánicos Abrúpticos, francos a veces moderadamente profundos (Praderas Planosólicas). Los Brunosoles se dan en las laderas convexas o planas, en tanto que los Argisoles se relacionan a la zona alta más suave de los interfluvios. Este tipo de suelos se da en el sur del Departamento

de Treinta y Tres y norte de Rocha, en tanto que en el sur de Rocha y Maldonado dominan los Brunosoles de texturas más finas y mayor fertilidad natural. Asociados a estos, ocurren suelos de menor espesor: Brunosoles Lúvicos moderadamente profundos ródicos (Praderas Rojas) y accesoriamente Litosoles Subéutricos Melánicos, a veces muy superficiales. Ambos se relacionan a áreas más con proximidad de afloramientos rocosos. El material madre está constituido por un débil manto (a veces discontinuo) de sedimentos limo arcillosos cuaternario sobre la roca del basamento cristalino. La vegetación es de pradera predominantemente estival, y el uso actual pastoril. Ocupa áreas importantes al oeste y suroeste de Treinta y Tres, alrededores de Velázquez y sur del Departamento de Maldonado. Los suelos de este grupo corresponden a la unidad José Pedro Varela de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.)(MGAP, 1996).

En el caso de los suelos 2.11a, son sierras rocosas con paisaje ondulado fuerte y pendientes entre 5 y 20 %. Los materiales geológicos están constituidos básicamente por rocas ígneas, metamórficas y algunas efusivas ácidas, y la rocosidad puede alcanzar niveles de hasta el 10 %. En este grupo, deben establecerse dos regiones con asociaciones de suelos diferentes: a) La región sur, (Departamentos de Lavalleja, Maldonado, Rocha y parte de Treinta y Tres), donde los suelos dominantes son Brunosoles Subéutricos Háplicos, arenoso franco gravillosos y franco gravillosos, superficiales, pedregosos (Regosoles). Asociados a estos, ocurren Brunosoles Subéutricos Típicos, francos, moderadamente profundos, a veces profundos (Praderas Pardas moderadamente profundas), en algunos casos a contacto lítico; y Litosoles Subéutricos Melánicos, areno gravillosos, a veces pedregosos y muy superficiales; con afloramientos rocosos. Los Brunosoles (Háplicos y Típicos) ocupan en conjunto más del 70 % del área y se desarrollan entre los afloramientos de rocas fundamentalmente migmatitas y granitos intrusivos, en tanto que los Litosoles ocurren próximos a los afloramientos, o en las áreas más rocosas de la unidad. b) La región norte, (Departamentos de Cerro Largo y norte de Treinta y Tres) en la que los suelos dominantes son Inceptisoles Úmbricos, franco arenosos, gravillosos, a veces pedregosos, superficiales y moderadamente profundos, ácidos con tenores variables de aluminio.

Asociados a estos, existen Litosoles Dístricos, Úmbricos, franco arenosos, gravillosos y ácidos. La vegetación es pradera de ciclo estival y matorrales asociados, y el uso es pastoril. Esta unidad ocupa áreas importantes de la Sierra de los Ríos, extensas zonas entre Valentines, Tupambaé y Treinta y Tres, alrededores de Aiguá, etc. Los suelos son integrantes de la unidad Santa Clara y parte de la unidad Sierra de Aiguá de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) (MGAP, 1996).

Los suelos 2.12 son sierras no rocosas de relieve ondulado y ondulado fuerte, con afloramientos en general menores de 5 % y pendientes variables entre 5 y 15 %. Los suelos son Brunosoles Subéutricos Háplicos y Típicos, arenoso francos y francos, algunas veces arenosos franco gravillosos, superficiales y moderadamente profundos, (Regosoles y Praderas Pardas medias poco profundas). Asociados a estos, se encuentran Litosoles Subéutricos Melánicos, arenoso-franco-gravillosos, a veces muy superficiales y pedregosos y Brunosoles Subéutricos Lévicos (Praderas Pardas máximas), francos u ocasionalmente arenoso-francos, a veces ródicos (Praderas Rojas). La vegetación es de pradera de ciclo predominantemente estival, a veces con matorral y monte serrano asociado, en general en las gargantas y zonas cóncavas. El uso actual es pastoril. Ocupa grandes extensiones en los departamentos de Maldonado, Lavalleja, oeste de Treinta y Tres y suroeste de Cerro Largo. Los suelos de este grupo forman parte de la unidad Sierra de Polanco de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) (MGAP, 1996).

Los suelos 9.42 se localizan en el Departamento de Canelones en los alrededores de Migueles. El material geológico corresponde a areniscas con cemento arcilloso de color pardo rojizo debido a la presencia de óxidos férricos. El relieve es ondulado, con pendientes predominantes de 2 a 5 % en algunas zonas y ondulado fuerte en otras con pendientes de 3 a 8 %. Presenta erosión muy severa, reflejada por una enorme densidad de cárcavas y frecuentemente una pérdida de los horizontes superiores por la erosión laminar. Los suelos corresponden a Brunosoles Subéutricos Típicos, a veces Lúvicos, de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa pesada, fertilidad media, generalmente bien drenados, aunque en las laderas bajas el drenaje es moderadamente bueno y a veces imperfecto. Generalmente existen cantos, aunque no en cantidad suficiente como para

considerarlos pseudolitos (Pradera Parda a Pardo Rojiza media). Asociados existen Argisoles Subéutricos Ócricos Típicos (Praderas Pardas máximas), fase húmica, de color pardo rojizo oscuro, textura franco arenosa, fertilidad media y baja y drenaje variable según la posición topográfica, desde bien drenados (ródicos) a imperfectamente drenados (hidromórficos). También existen cantos aunque no en los espesores que se exigen para la fase pseudolítica. La mayoría de estas tierras han sido abandonadas para el uso agrícola, estando actualmente bajo uso pastoril muy limitado. Integra la unidad Chapicuy de la carta a escala 1:1.000.000. (D.S.F.) (MGAP, 1996).

Los suelos 5.02b existe repetidamente en los departamentos de Florida y en el Dpto. de Flores (Puntas del San José) y en el resto de la región definida para la zona 5. El relieve es ondulado y ondulado fuerte, con pendientes modales de 5 a 7 %. El material geológico corresponde a litologías variables de rocas predevonianas, como granitos, migmatitas, rocas metamórficas esquistosas (alrededores de Rosario), etc. Los suelos son Brunosoles Subéutricos Háplicos moderadamente profundos y superficiales (Praderas Pardas moderadamente profundas y Regosoles), a los que se asocian Inceptisoles (Litosoles) a veces muy superficiales. El horizonte superior es de color pardo y pardo rojizo, a veces pardo amarillento, de textura franca, franco gravilosa o arenoso franca con gravillas abundantes, la fertilidad es media, a veces baja. La rocosidad es moderada y varía entre un 2 al 10 % del área con afloramientos. En toda el área pueden existir bajos angostos, asociados a vías de drenaje de poca importancia, que contienen Gleysoles Lúvicos (Gley húmicos) y Brunosoles Eutricos Típicos o Lúvicos (Praderas Negras y Praderas Pardas máximas), hidromórficas, que contienen muy buenas pasturas estivales. El uso es pastoril. Este grupo corresponde a la unidad San Gabriel-Guaycurú en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) (MGAP, 1996).

Los suelos 0.71, comprende áreas litorales marítimas o continentales recubiertas con espesores variables de arenas, fijadas por vegetación psamófila, ubicadas en los departamentos de Rocha y Maldonado y todos los cordones arenosos asociados a la costa marítima y platense existentes en los departamentos de Canelones, Montevideo, San José y Colonia. También corresponden a este grupo los médanos arenosos

localizados en las proximidades de los ríos Negro y Yí. Estas arenas y los arenosoles ocrícos (dunas arenosas) asociados son de muy baja fertilidad y excesivamente drenados, aunque existen áreas deprimidas por drenaje pobre y muy pobre (a veces con pequeños espesores de turba), con vegetación hidrófila. En las proximidades de la costa, la vegetación es psamófila mientras que en el interior, normalmente existe vegetación de pradera estival, de tapiz ordinario y algo abierto (MGAP, 1996).

En estas áreas están localizados la mayoría de los balnearios, existiendo plantaciones forestales mayormente de pino marítimo y algún uso pastoril muy limitado. Este grupo integra las unidades Angostura y Balneario Jaureguiberry en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) (MGAP, 1996).

El grupo de suelos 10.6b se localiza como una franja en el sur de los departamentos de Montevideo, Canelones y San José. El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos del cuaternario, de color pardo a pardo naranja.

El relieve es suavemente ondulado, con predominio de pendientes de 1 a 3 %. En el departamento de Canelones, aproximadamente al este de Toledo el relieve es más fuerte ya que se encuentra influido por la proximidad del basamento cristalino dando un predominio de pendientes de 2 a 4 %, presenta grados de erosión definibles en general como severa. Los suelos predominantes corresponden a Brunosoles Subéutricos, a veces Eutricos, típicos y lúvicos (praderas pardas medias y máximas), de color pardo a pardo oscuro, textura franco limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. El uso predominante es hortícola, frutícola y de cultivos a escala de pequeña chacra. Es común la existencia de tierras que actualmente no sirven para cultivos en forma intensiva, las cuales pasan a uso pastoril, que en algunos casos es limitado por la degradación de los suelos. Este grupo se encuentra integrado en la unidad Toledo de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) (MGAP, 1996).

Al grupo 10.8a le corresponden la mayoría de las tierras onduladas suaves de los departamentos de Canelones y San José, situándose en los alrededores de centros poblados tales como Libertad, San José, Tala, Canelones, San Bautista, etc. Existen con menor extensión en los departamentos de Colonia y Maldonado. El material geológico

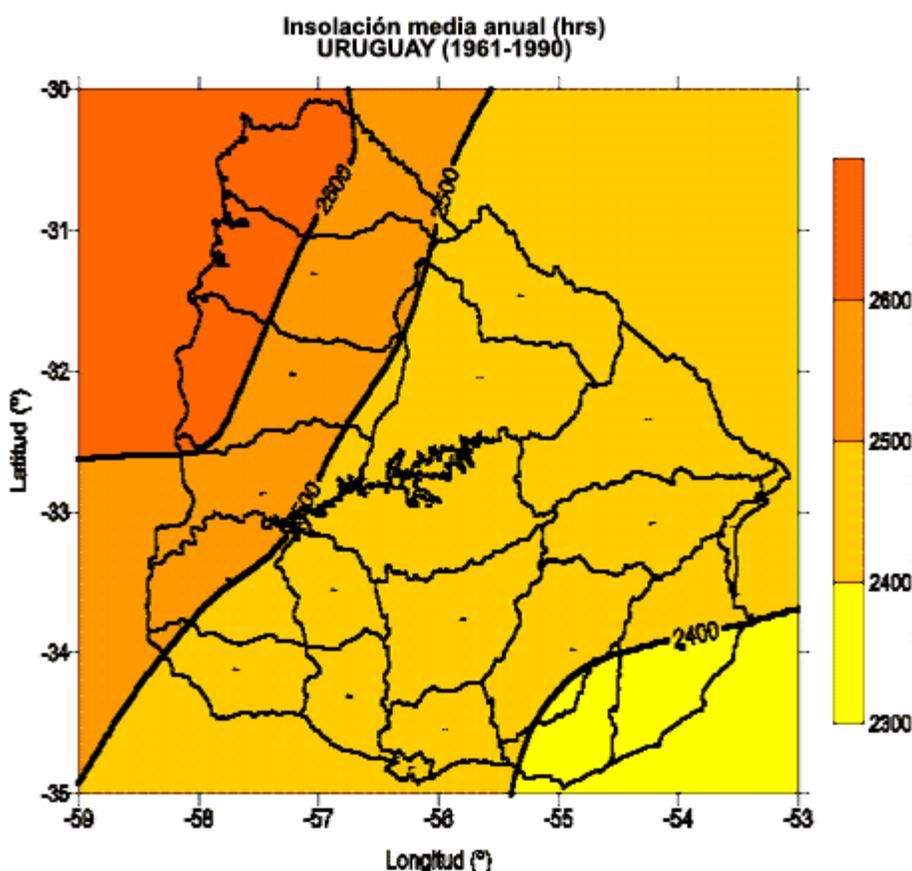
corresponde a sedimentos limo arcillosos de color pardo y normalmente con concreciones de carbonato de calcio. El relieve es suavemente ondulado a ondulado con predominio de pendientes de 1 a 4 %, existiendo una región en los alrededores de Tapia con pendientes de 3 a 6 %. Debe indicarse que esta región ha sido la primera en incorporarse a la agricultura en el país y que este grupo ocurre en laderas convexas, con sus respectivas concavidades, donde naturalmente el riesgo de erosión es alto y donde se han realizado cultivos anuales (entre ellos estivales carpidos), en forma continua y sin ninguna medida de conservación de suelos. Estas han sido las causas de la erosión severa y en algunas áreas muy severas que existen actualmente, identificándose con la presencia de un padrón de cárcavas de densidad alta y muy alta, y suelos con erosión laminar en diversos grados. Los suelos corresponden a Vertisoles Rupticos Típicos y Lúvicos (Grumosoles) y Brunosoles Eutricos y Subéutricos Típicos (Praderas Negras y Pardas medias), de color negro o pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. Este grupo se corresponde a las unidades Tala-Rodríguez, Libertad y San Jacinto e integran en menor proporción las unidades Ecilda Paullier-Las Brujas e Isla Mala de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F) (MGAP, 1996).

### 3.2.3. Clima

Uruguay le corresponde la clasificación climática Köppen “Cfa” (Ilustración 2). Templado y húmedo tipo “C”, precipitaciones todo el año tipo “f”, temperatura del mes más cálido superior a 22° C tipo “a”.

La insolación acumulada media para todo el Uruguay es 2500 horas, con un máximo de 2600 horas en Salto y un mínimo de 2300 horas en la costa oceánica.

Ilustración 2 Insolación media anual en horas para el Uruguay

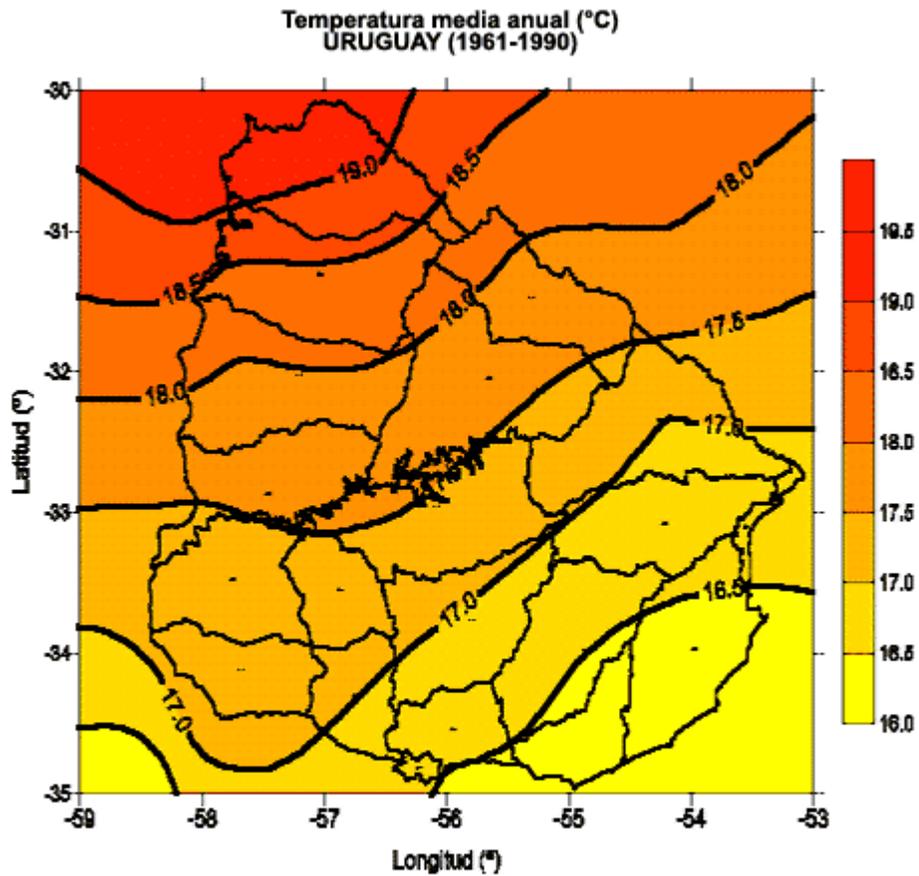


Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

Las temperaturas medias para todo el Uruguay son de 17.5° C, con una isoterma máxima de 19.0° C sobre Artigas y una mínima de 16.0° C sobre la costa atlántica en Rocha. El comportamiento del campo térmico está influenciado al noroeste del país por

la continentalidad típica del centro del continente, y por el efecto moderador principalmente en las costas de Rocha y Maldonado. Las amplitudes térmicas son mayores a medida que nos alejamos de la costa (Ilustración 3).

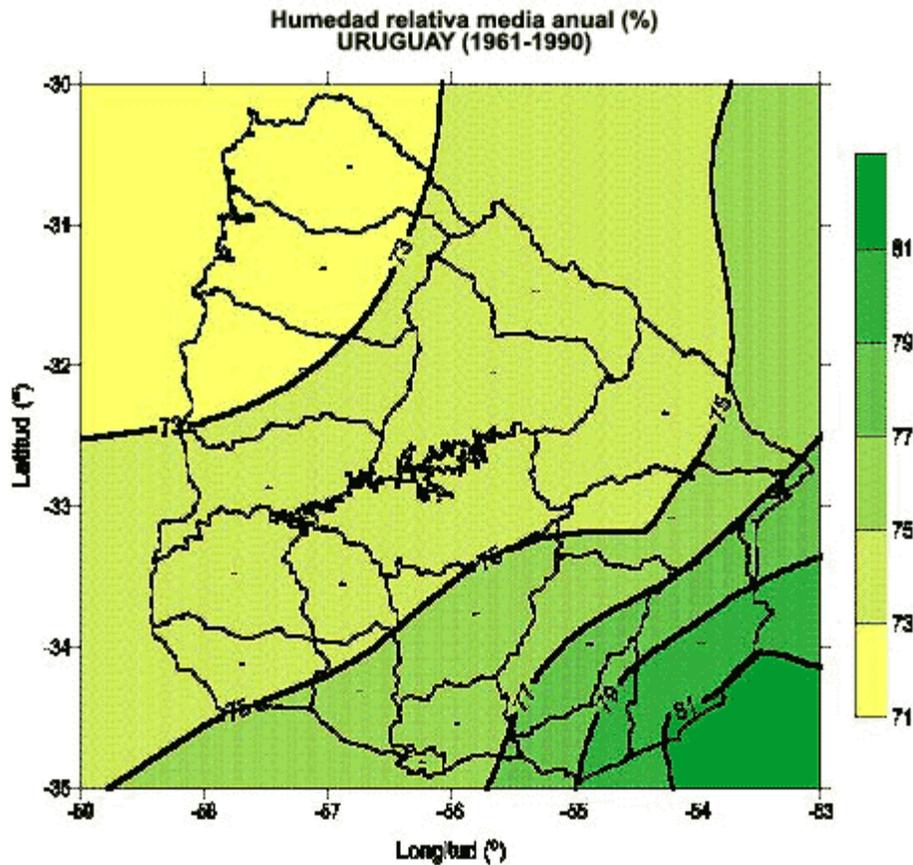
Ilustración 3 Distribución de la temperatura media anual



Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

La humedad relativa media diaria es obtenida a través del promedio de las 24 observaciones horarias. Se observa un crecimiento de las líneas de igual humedad relativa de noroeste a sureste. La humedad relativa media para todo el Uruguay es 75 %, con una isolínea máxima de 81 % en Rocha y una mínima de 72 % en Salto y oeste del Departamento de Artigas (Ilustración 4).

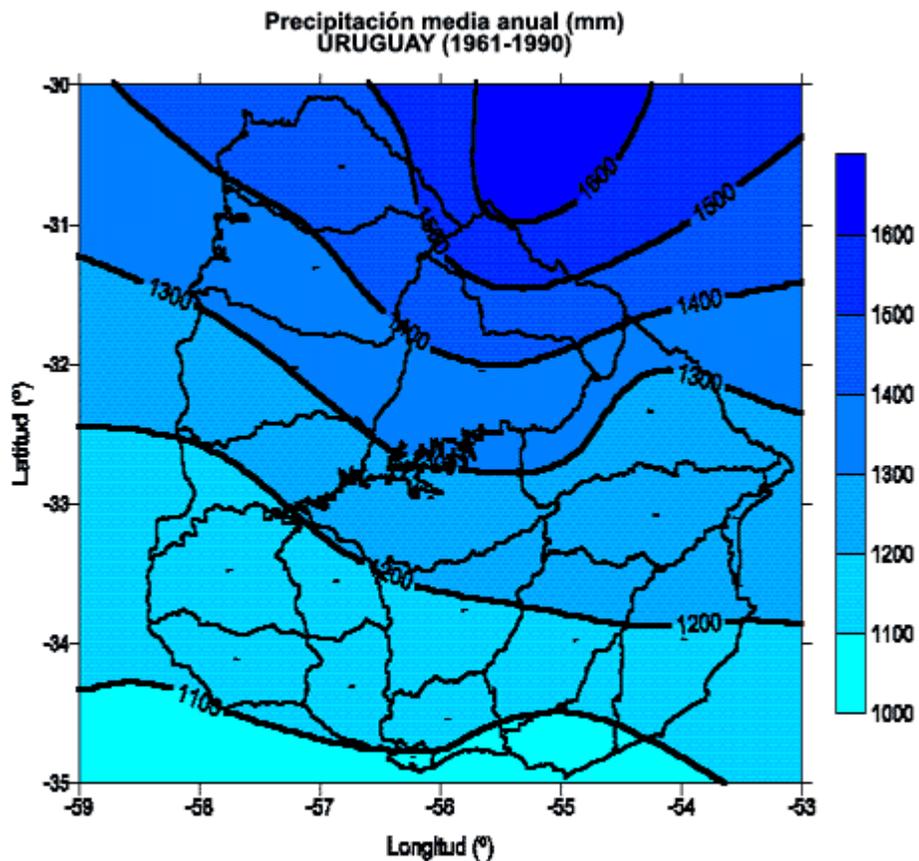
**Ilustración 4 Distribución de la humedad relativa media anual (%)**



Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

Las precipitaciones acumuladas anuales medias para todo el Uruguay son del orden de los 1300 mm, con una isoyeta máxima de 1600 mm en Rivera y una mínima de 1100 mm en la costa del Río de la Plata. Uruguay tiene un clima lluvioso, sin estación seca, pero con alta variabilidad interanual (Ilustración 5).

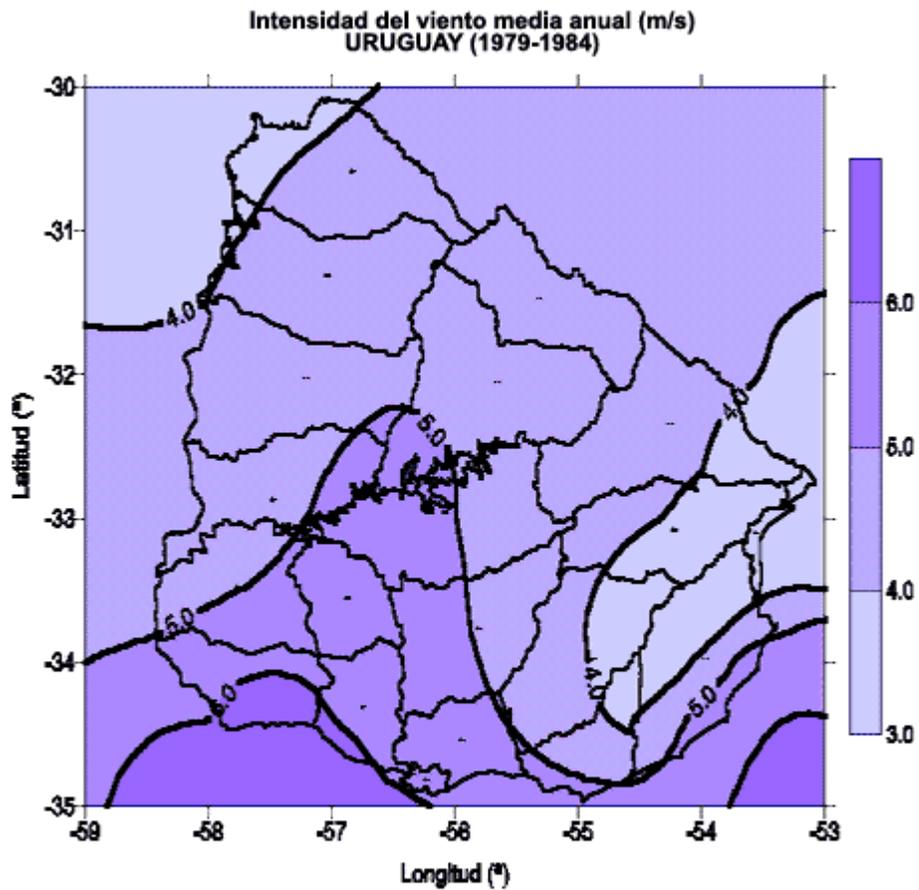
**Ilustración 5** Distribución de la precipitación media anual en milímetros en el Uruguay



Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

El régimen de vientos muestra un marcado predominio del sector NE al E, con velocidades del orden de 4 m/s, con un máximo medio sobre la costa suroeste de 7 m/s. Son relativamente frecuentes los vientos superiores a 30 m/s (Ilustración 6).

**Ilustración 6** Distribución de la intensidad del viento meda anual en metros por segundo para el Uruguay.



Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

### **3.3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

- Forcípula (80 cm) con una precisión al milímetro
- Cinta métrica (50 m) con una precisión al milímetro
- Motosierra Husqvarna 040
- Material de registro

### **3.4. TRABAJO DE TERRENO**

Se refiere a la obtención de la información básica de terreno cubriéndose la gama de condiciones presentes en los predios. Para la estimación de la función de volumen cúbico individual se registraron las siguientes mediciones:

#### **3.4.1. Selección de individuos**

Los individuos a ser medidos se tomaron al azar en cada uno de los bosques visitados.

#### **3.4.2. Medición de árboles en pie**

Se tomó el diámetro a la altura del pecho (DAP) con corteza en centímetros, si es de monte fustal y medido desde la base del tocón anterior, si es de monte tallar, utilizando forcípula.

#### **3.4.3. Mediciones del árbol volteado**

Se tomó un diámetro cada un metro de largo hasta el total de fuste medible.

#### **3.4.4. Cubicación**

Para la clasificación de cada troza se utilizó la fórmula de Smalian para el volumen de conoides truncados.

$$V = \frac{\pi}{8} * (D^2 + d^2) * L$$

Donde:

V: Volumen cúbico con corteza

D: Diámetro en la cara inferior con corteza en metros

d: Diámetro en la cara superior con corteza en metros

L: Largo de la troza en metros

### **3.5. OBTENCIÓN DE LOS MODELOS A UTILIZAR EN LOS AJUSTES**

Para preseleccionar los modelos de regresión lineal posibles, se realizó una matriz de correlación y gráficos XY, donde se cruzaron todas las variables probadas en la literatura, verificando correlación entre variables independientes y correlación entre pares de variables independiente-dependiente incluidas en algún modelo preestablecido. De esta manera se determinó las posibles variables a incorporar al modelo y eliminar aquellas que por alta correlación no justificaban su inclusión.

### **3.6. AJUSTE DE MODELOS**

El ajuste de los modelos se realizó por mínimos cuadrados, utilizando como herramienta el programa estadístico Infostat, verificando los supuestos del modelo de regresión lineal y determinando la significancia estadística de los coeficientes de regresión.

### **3.7. SELECCIÓN DEL MODELO**

Se seleccionaron aquellos mejores 3 modelos y para ello se utilizó el  $R^2$  ajustado. seleccionando aquel modelo que presentó mayor  $R^2$  ajustado y menor error cuadrático medio de entre todos los modelos que cumplieron con los supuestos.

### **3.8. VALIDACIÓN**

Se realizó autovalidación, obteniendo al azar el 10 % de la muestra para realizar dicho estudio. Cada modelo se sometió a la prueba de exactitud de Freese modificado por Vallejos, el cual es una extensión del procedimiento desarrollado por Freese en 1960. La modificación consiste en que se proporciona un criterio estadístico para identificar posibles sesgos en función de la estimación. El nivel de exactitud requerida fue de un 80 %. En el caso de no cumplir la exactitud requerida se determinó el nivel alcanzado en cada situación.

#### **4. RESULTADOS**

Se presentan a continuación los modelos que obtuvieron mejor ajuste para las tablas generales de volumen total y comercial con corteza. Para cada una de los Cuadros se anexa un detalle de las principales estadísticas descriptivas del material trabajado y de los coeficientes de correlación del cruce de las distintas variables con las variables de interés.

También se detalla en cada modelo el análisis de regresión lineal, los coeficientes de regresión y estadísticas asociadas, la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov, el estudio del sesgo del modelo y el estudio de la exactitud lograda.

Se presentan además las gráficas de dispersión de datos, el modelo de regresión obtenido con sus límites de confianza, los residuos estudentizados del volumen observado en función del valor predicho y finalmente la distribución de los residuos con respecto a la normal.

En los anexos 2 al 14 se presentan los modelos para las tablas locales de volumen total con corteza y del 15 al 27 los correspondientes a las tablas locales de volumen comercial con corteza.

##### **4.1. TARIFAS GENERALES PARA VOLUMEN TOTAL CON CORTEZA**

El material utilizado contó con 266 individuos, con un diámetro a la altura del pecho promedio de 14,3 cm, con un mínimo de 3,2 cm y 30 cm máximo (Cuadro 11). La altura total se encontraba con un valor promedio de 14,8 m, con un mínimo de 5,3 m y un máximo de 27 m.

**Cuadro 11 Estadística descriptiva**

Variable	n	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx
DAP	266	14,31	5,25	0,32	36,67	3,2	30
HTOTAL	266	14,82	3,84	0,24	25,94	5,26	26,59
VOLRTOT	266	0,13	0,12	0,01	88,75	3,90E-03	0,73

**Cuadro 12 Coeficientes de correlación**

*Correlación de Pearson: coeficientes/probabilidades*

	VOLRTOT	DAP	HTOTAL	AB	DAP <sup>2</sup>	DAP <sup>3</sup>	1/DAP	H <sup>2</sup>	H*DAP	H*DAP <sup>2</sup>	H <sup>2</sup> *DAP	LN_VOLRTOT	LN_H*D
VOLRTOT	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP	0,9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HTOTAL	0,8	0,81	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AB	0,95	0,97	0,76	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP <sup>2</sup>	0,95	0,97	0,76	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP <sup>3</sup>	0,95	0,91	0,69	0,98	0,98	1	0	0	0	0	0	0	0
1/DAP	-0,62	-0,84	-0,77	-0,71	-0,71	-0,6	1	0	0	0	0	0	0
H <sup>2</sup>	0,85	0,8	0,98	0,78	0,78	0,74	-0,69	1	0	0	0	0	0
H*DAP	0,96	0,95	0,9	0,96	0,96	0,92	-0,75	0,93	1	0	0	0	0
H*DAP <sup>2</sup>	0,98	0,92	0,8	0,97	0,97	0,98	-0,63	0,85	0,97	1	0	0	0
H <sup>2</sup> *DAP	0,96	0,88	0,89	0,91	0,91	0,9	-0,64	0,94	0,98	0,97	1	0	0
LN_VOLRTOT	0,82	0,94	0,9	0,85	0,85	0,76	-0,93	0,86	0,91	0,81	0,83	1	0
LN_H*DAP <sup>2</sup>	0,8	0,94	0,89	0,86	0,86	0,76	-0,95	0,84	0,9	0,81	0,82	0,99	1

La Cuadro 12 presenta los coeficientes de correlación de Pearson entre las distintas variables de interés. Se observa que el logaritmo normal del volumen real total y el logaritmo normal del producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado tiene mayor coeficiente (0,99), seguido por un coeficiente de 0,98 entre el volumen real total y el producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado. En tercer lugar, con un valor de 0,96 el volumen real total y el producto de la altura total y el diámetro a la altura del pecho, así como también el producto de la altura total al cuadrado por el diámetro a la altura del pecho.

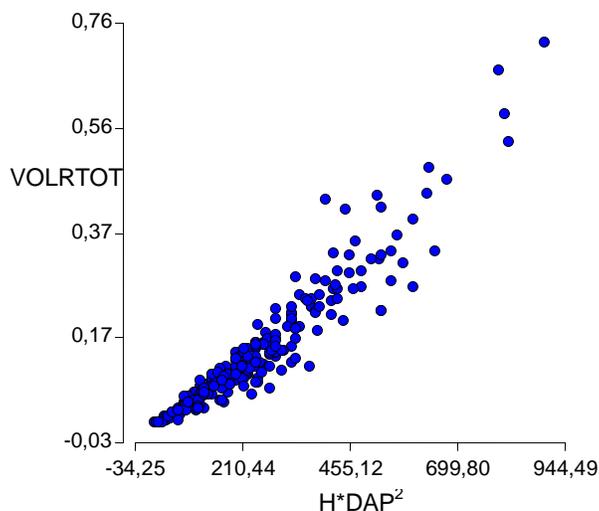
#### 4.1.1. Modelo VolRealTotal= $\beta_0 + \beta_1 * H * DAP^2 + \epsilon$

La relación entre el volumen real total individual y el producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado presenta en el gráfico de dispersión una tendencia lineal (Ilustración 7). Realizado el análisis de regresión se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado de 0,96 y error cuadrático medio ponderado pequeño (Cuadro 13). En la Cuadro 14 se presentan los datos de los coeficientes de regresión estimados y en la Cuadro 15 el análisis de la varianza donde se observa que el modelo es significativo.

El ajuste del modelo con sus límites de confianza y los datos observados se presentan en la Ilustración 8. Si se grafican los residuos, se puede ver que tienen cierta alineación con la normal (Ilustración 9).

Realizada la validación, se llega a que el modelo es insesgado (Cuadro 17), pero no logra tener una exactitud buena (Cuadro 18).

**Ilustración 7 Volumen real total en metros cúbicos en función del diámetro a la altura del pecho al cuadrado.**



**Cuadro 13 Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
VOLRTOT	266	0,96	0,96	5,50E-04

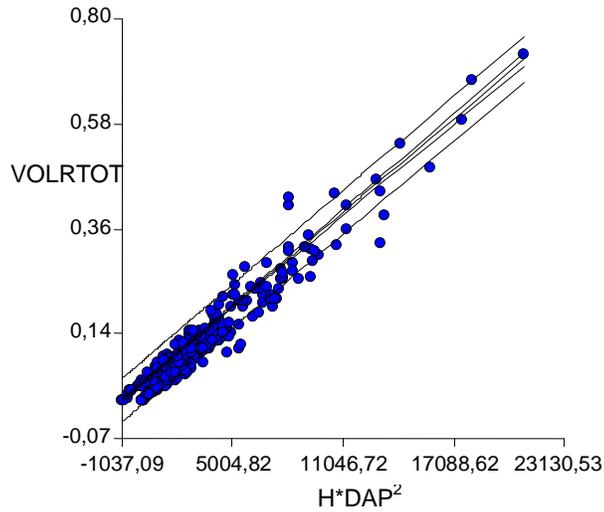
**Cuadro 14 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	4,70E-03	2,10E-03	5,80E-04	0,01	2,25	0,0255	
H*DAP <sup>2</sup>	3,20E-05	4,00E-07	3,20E-05	3,30E-05	80,97	<0,0001	6532,4

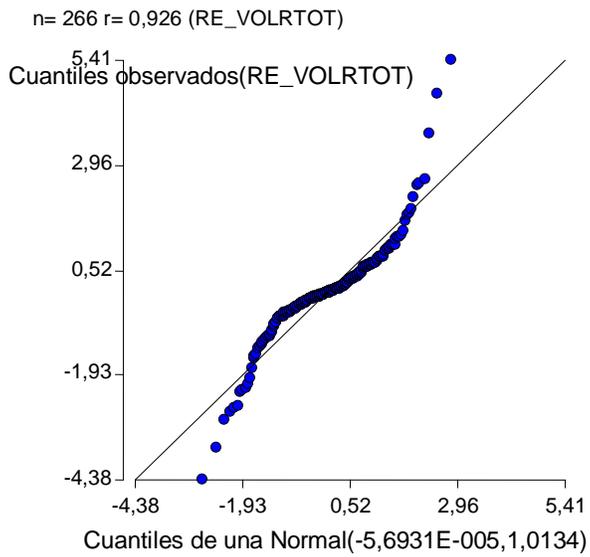
**Cuadro 15 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,45	1	3,45	6556,14	<0,0001
H*DAP <sup>2</sup>	3,45	1	3,45	6556,14	<0,0001
Error	0,14	264	5,30E-04		
Total	3,59	265			

**Ilustración 8 Volumen real total en función de la altura total por diámetro a la altura del pecho al cuadrado.**



**Ilustración 9 Gráfico de distribución con la normal**



**Cuadro 16 Prueba de Kolmogorov para bondad de ajuste**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
RE_VOLRTOT	Normal(0,1)	-5,70E-05	1,01	266	0,14	<0,0001

**Cuadro 17 Estudio del sesgo del modelo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	0,0081	0,0096	0,8461	0,4059	Insesgado
b	0,9114	0,0577	-1,5351	0,1378	

**Cuadro 18 Estudio de la exactitud lograda**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
38,89	38,89	Modelo inexacto	58,04

#### **4.1.2. Modelo LnVolRealTotal= $\beta_0 + \beta_1 * \text{Ln}(H * \text{DAP}^2) + \varepsilon$**

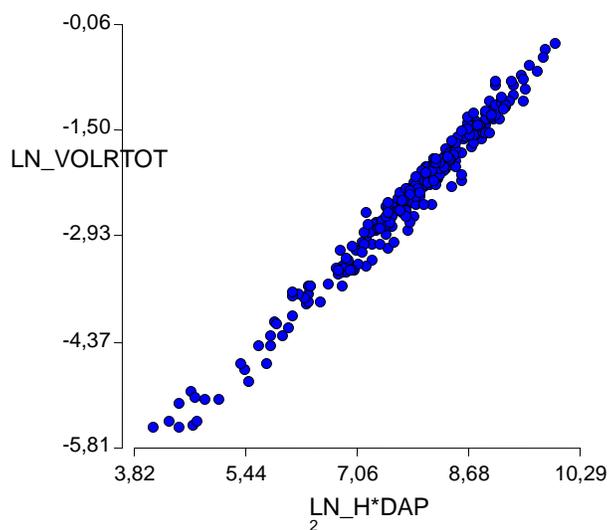
Analizando el gráfico de dispersión del logaritmo normal del volumen real total y el logaritmo normal del producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado se obtiene una tendencia lineal.

El análisis de regresión permitió obtener un coeficiente de determinación ajustado elevado (0,98) y un error cuadrático medio ponderado bajo (0,02) (Cuadro 19). La Cuadro 20 presenta los coeficientes de regresión estimados y en la Cuadro 21 se puede observar que el modelo ha sido significativo.

La representación gráfica de los residuos estudentizados en función de los valores predichos no muestra ninguna tendencia especial, lo que indica una buena calidad de ajuste (Ilustración 12) y el Leverage solo muestra unos pocos casos que son importantes (Ilustración 13).

La determinación del sesgo del modelo permitió clasificar el modelo como de tipo variable (Cuadro 23) y alcanzando una exactitud del 73%.

**Ilustración 10** Logaritmo natural del volumen real total en metros cúbicos en función del logaritmo normal de la altura total por diámetro a la altura del pecho al cuadrado



**Cuadro 19** Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
LN_VOLRTOT	266	0,98	0,98	0,02

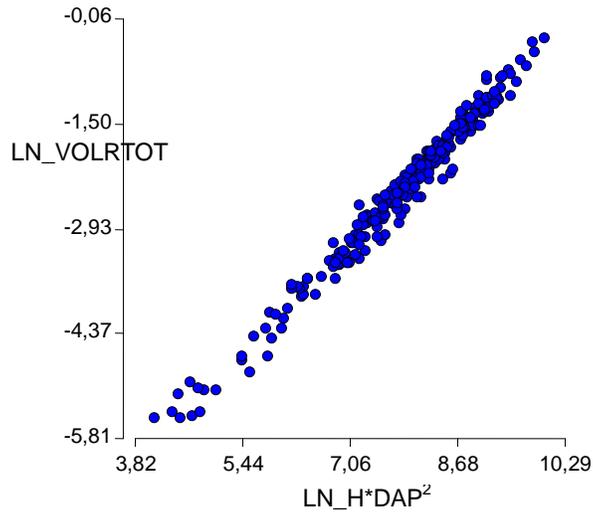
**Cuadro 20** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	-9,75	0,07	-9,88	-9,62	-146,57	<0,0001	
LN_H*DAP <sup>2</sup>	0,93	0,01	0,92	0,95	110,85	<0,0001	12242,15

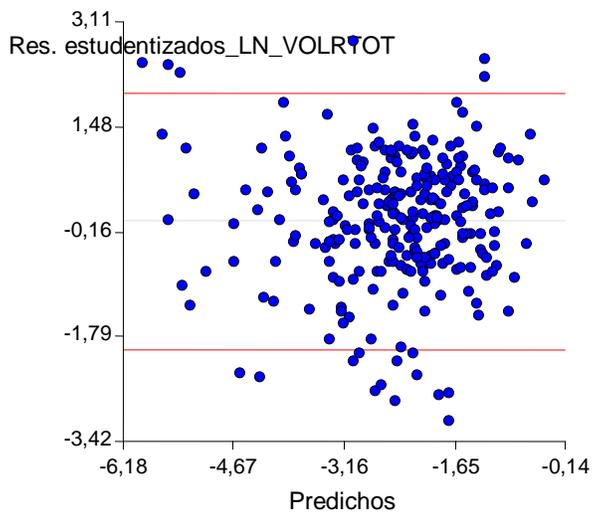
**Cuadro 21** Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	277,13	1	277,13	12287,51	<0,0001
LN_H*DAP <sup>2</sup>	277,13	1	277,13	12287,51	<0,0001
Error	5,95	264	0,02		
Total	283,09	265			

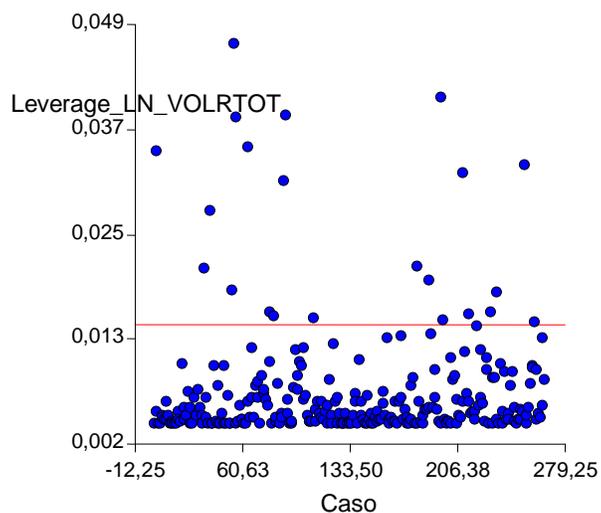
**Ilustración 11** Logaritmo natural del volumen real total en función del logaritmo natural del producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado



**Ilustración 12** Residuos estudentizados del logaritmo natural del volumen real total en función de los predichos



**Ilustración 13 Leverage del logaritmo natural del volumen real total según el caso**



**Cuadro 22 Prueba de Kolmogorov para bondad de ajuste**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
PRED_LN_VOLRTOT	Normal(0,1)	-2,45	1,05	266	0,82	<0,0001

**Cuadro 23 Determinación del sesgo del modelo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	0,0101	0,0089	1,1407	0,2653	Sesgo variable
b	0,8541	0,0533	-2,7380	0,0115	

**Cuadro 24 Determinación de la exactitud del modelo**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
36,42	36,42	Modelo exacto	72,83

#### **4.1.3. Modelo VolRealTotal= $\beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \epsilon$**

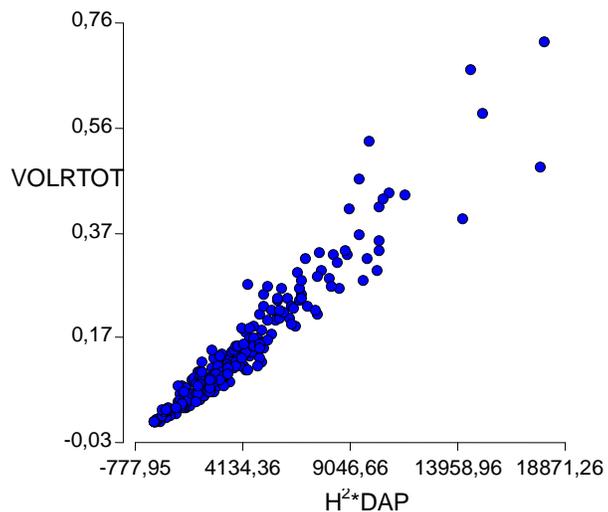
Al igual que los casos anteriores, la dispersión de puntos entre el volumen real total y el producto de la altura total al cuadrado por el diámetro a la altura del pecho muestra una tendencia lineal (Ilustración 14).

El análisis de regresión permitió establecer un coeficiente de determinación ajustado alto (0,92) y un pequeño error cuadrático medio (Cuadro 25). La Cuadro 26 presenta los coeficientes de regresión estimados y la Cuadro 27 permite concluir que el modelo es altamente significativo.

Comparando la línea de regresión obtenida y los valores observados con los respectivos límites de confianza se puede observar la calidad del ajuste del modelo (Ilustración 15). El Leverage del volumen real total muestra que son pocos los casos que son elevados (Ilustración 16). Los residuos estudentizados en función de los valores predichos presentan una cierta tendencia en los valores pequeños que puede llevar a un error (Ilustración 17), mientras que los residuos se presentan mayormente distribuidos en forma normal (Ilustración 18).

La determinación del sesgo indicó que el mismo es constante (Cuadro 29) y que el modelo es inexacto al lograrse solamente 33 % de exactitud.

**Ilustración 14** Volumen real total en función del producto de la altura total al cuadrado por el diámetro a la altura del pecho



**Cuadro 25** Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
VOLRTOT	266	0,92	0,92	1,10E-03

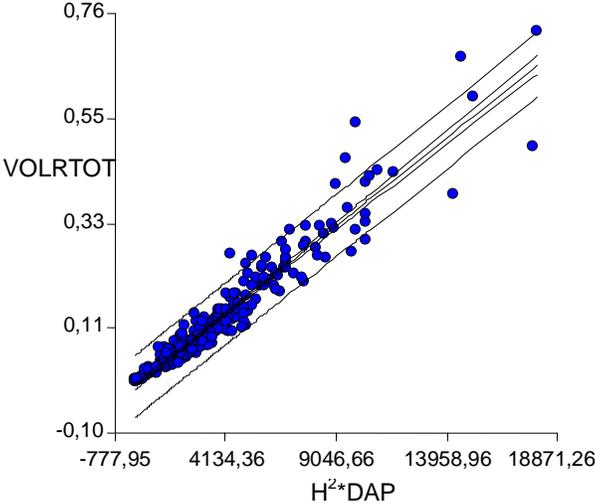
**Cuadro 26** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	-0,01	3,20E-03	-0,02	-4,50E-03	-3,37	0,0009	
H <sup>2</sup> *DAP	3,70E-05	6,60E-07	3,60E-05	3,80E-05	56,3	<0,0001	3158,51

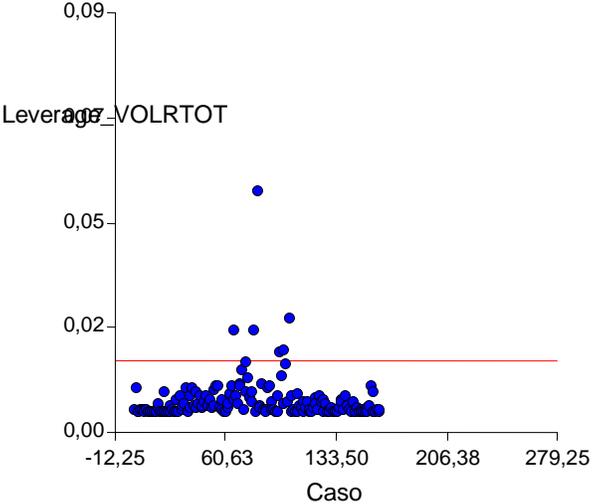
**Cuadro 27** Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,32	1	3,32	3169,47	<0,0001
H <sup>2</sup> *DAP	3,32	1	3,32	3169,47	<0,0001
Error	0,28	264	1,00E-03		
Total	3,59	265			

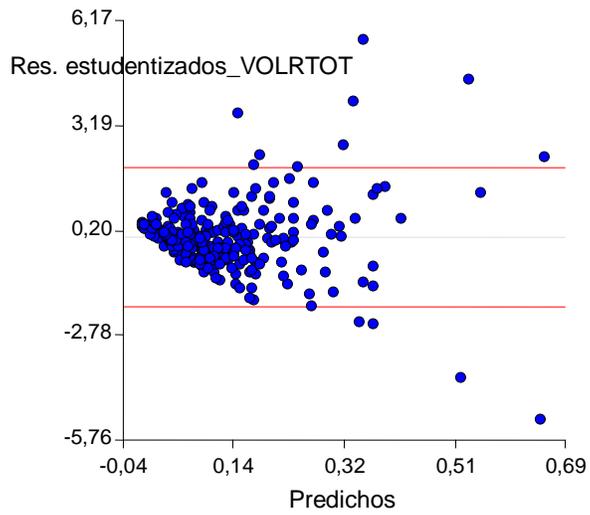
**Ilustración 15 Modelo de regresión lineal**



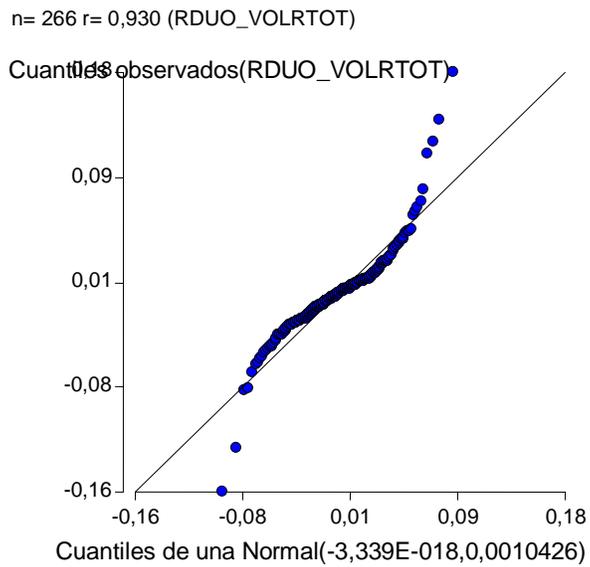
**Ilustración 16 Leverage de volumen real total según el caso**



**Ilustración 17 Residuos estudentizados del volumen real total en función de los predichos**



**Ilustración 18 Residuos del volumen real total**



**Cuadro 28 Prueba de Kolmogorov para bondad de ajuste**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
RDUO_VOLRTOT	Normal(0,1)	0	1,00E-03	266	0,46	<0,0001

**Cuadro 29 Determinación del sesgo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	0,0214	0,0058	3,6848	0,0014	Sesgo constante
b	0,9803	0,0331	-0,5962	0,5574	

**Cuadro 30 Determinación de la exactitud**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
33,92	33,92	Modelo inexacto	32,81

#### **4.2. TARIFAS VOLUMÉTRICAS GENERALES PARA VOLUMEN COMERCIAL CON CORTEZA**

El material utilizado contó con 266 individuos, con un diámetro a la altura del pecho promedio de 14,3 cm, con un mínimo de 3,2 cm y 30 cm máximo (Cuadro 11).

El volumen real comercial en función de las diferentes variables de interés (Cuadro 31) presentó la mayor correlación (0,98) con el producto de la altura total por el diámetro a la altura del pecho. El mismo valor alcanza la correlación con el logaritmo normal del volumen real comercial y el logaritmo normal del producto de la altura comercial por el diámetro a la altura del pecho. Le sigue en importancia con un valor de correlación de 0,97 el producto de la altura comercial por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado.

**Cuadro 31 Coeficientes de correlación**

*Correlación de Pearson: coeficientes/probabilidades*

	VOLRCOM	DAP	HTOTAL	VOLRTOT	HCOM	DAP <sup>2</sup>	DAP <sup>3</sup>	1/DAP	H <sup>2</sup>	H*DAP	H*DAP <sup>2</sup>	H <sup>2</sup> *DAP	HCOM <sup>2</sup>	HCOM*D	HCOM*D <sup>2</sup>	HCOM <sup>2</sup> *D	LN_VOLRCOM	LN_HCOM*D	LN_HCOM*D <sup>2</sup>	LN_HCOM <sup>2</sup> D	
VOLRCOM	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP	0,9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HTOTAL	0,8	0,81	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VOLRTOT	1	0,9	0,8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCOM	0,79	0,85	0,95	0,79	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP <sup>2</sup>	0,95	0,97	0,76	0,95	0,78	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAP <sup>3</sup>	0,95	0,91	0,69	0,95	0,69	0,98	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/DAP	-0,62	-0,84	-0,77	-0,62	-0,83	-0,71	-0,6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sup>2</sup>	0,85	0,8	0,98	0,85	0,91	0,78	0,74	-0,69	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H*DAP	0,96	0,95	0,9	0,96	0,88	0,96	0,92	-0,75	0,93	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H*DAP <sup>2</sup>	0,98	0,92	0,8	0,98	0,78	0,97	0,98	-0,63	0,85	0,97	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sup>2</sup> *DAP	0,96	0,88	0,89	0,96	0,83	0,91	0,9	-0,64	0,94	0,98	0,97	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCOM <sup>2</sup>	0,86	0,84	0,92	0,87	0,96	0,81	0,76	-0,7	0,93	0,91	0,84	0,9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
HCOM*DAP	0,9	1	0,81	0,9	0,85	0,97	0,91	-0,84	0,8	0,95	0,92	0,88	0,84	1	0	0	0	0	0	0	0
HCOM*DAP <sup>2</sup>	0,97	0,92	0,78	0,97	0,8	0,97	0,97	-0,62	0,82	0,96	0,98	0,94	0,88	0,92	1	0	0	0	0	0	0
HCOM <sup>2</sup> *DAP	0,95	0,87	0,84	0,95	0,87	0,9	0,89	-0,62	0,88	0,95	0,94	0,95	0,95	0,87	0,97	1	0	0	0	0	0
LN_VOLRCOM	0,8	0,92	0,88	0,8	0,93	0,83	0,74	-0,93	0,83	0,88	0,79	0,81	0,85	0,92	0,78	0,79	1	0	0	0	0
LN_HCOM*DAP	0,79	0,96	0,82	0,79	0,88	0,88	0,78	-0,95	0,78	0,89	0,81	0,79	0,8	0,96	0,8	0,78	0,96	1	0	0	0
LN_HCOM*DAP <sup>2</sup>	0,74	0,91	0,86	0,75	0,92	0,81	0,71	-0,97	0,8	0,85	0,75	0,77	0,83	0,91	0,75	0,76	0,98	0,98	1	0	0
LN_HCOM <sup>2</sup> *DAP	0,67	0,83	0,87	0,68	0,93	0,72	0,62	-0,95	0,8	0,8	0,68	0,71	0,82	0,83	0,68	0,71	0,95	0,92	0,99	1	0

#### 4.2.1. Modelo VolRealCom= $\beta_0 + \beta_1 * H * DAP^2 + \varepsilon$

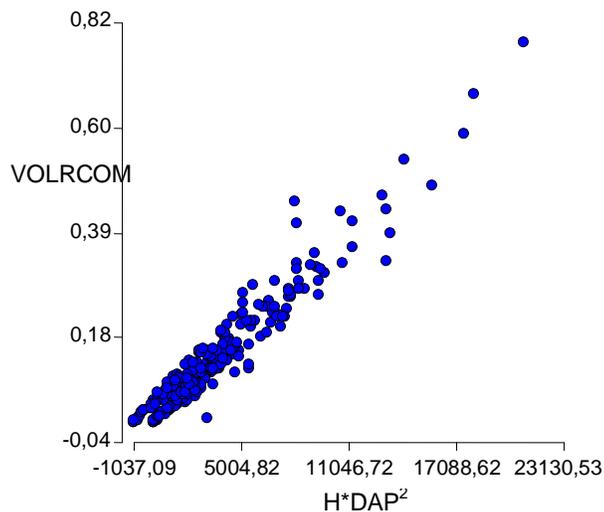
Realizado el diagrama de dispersión del volumen real comercial y del producto de la altura por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado, se observa que muestra una representación lineal (Ilustración 19).

El análisis de regresión encontró un coeficiente de determinación ajustado elevado (0,96) y un pequeño error cuadrático medio ponderado (Cuadro 32). La Cuadro 33 presenta la estimación de los coeficientes de regresión y la Cuadro 34 muestra que el presente modelo es significativo.

Representado el resultado del modelo, los límites de confianza y los valores reales de campo se observa el buen comportamiento del modelo (Ilustración 20). El valor del Leverage muestra que hay individuos con elevados valores (Ilustración 21). El análisis de los residuales del volumen real comercial presenta cierta concentración en los menores valores (Ilustración 22), pero dichos residuos tienen cierta tendencia a la distribución normal (Ilustración 23).

La determinación del sesgo indica que el modelo es insesgado (Cuadro 36) y que alcanza una exactitud de 64 %.

**Ilustración 19** Volumen real comercial en función del producto de la altura por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado



**Cuadro 32** Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
VOLRCOM	266	0,96	0,96	6,30E-04

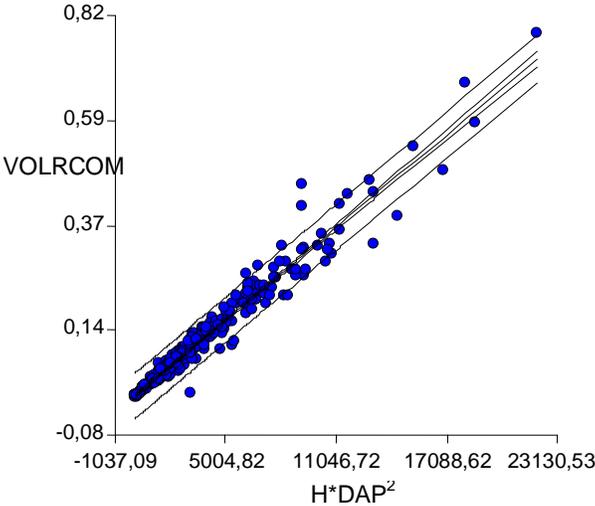
**Cuadro 33** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	1,60E-03	2,30E-03	-2,80E-03	0,01	0,71	0,4804	
H*DAP <sup>2</sup>	3,30E-05	4,30E-07	3,20E-05	3,40E-05	76,6	<0,0001	5845,82

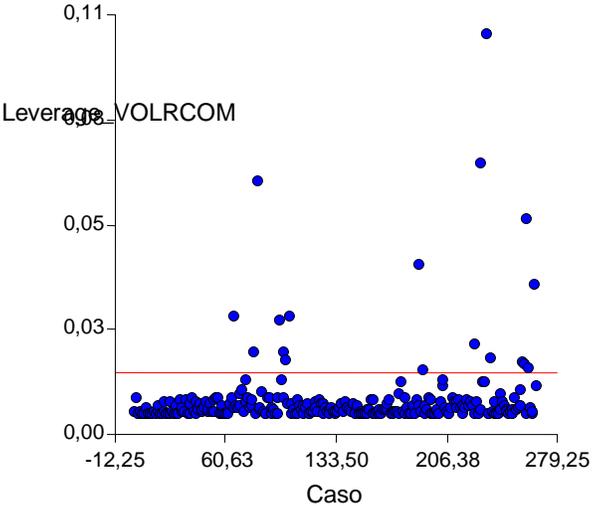
**Cuadro 34** Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,56	1	3,56	5866,96	<0,0001
H*DAP <sup>2</sup>	3,56	1	3,56	5866,96	<0,0001
Error	0,16	264	6,10E-04		
Total	3,72	265			

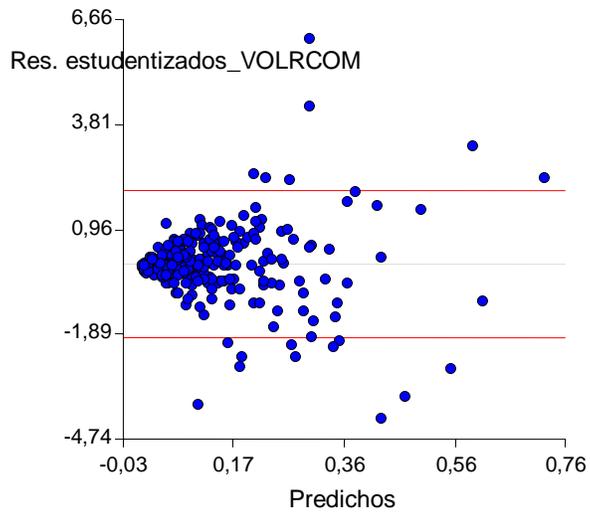
**Ilustración 20 Modelo de regresión del volumen real comercial**



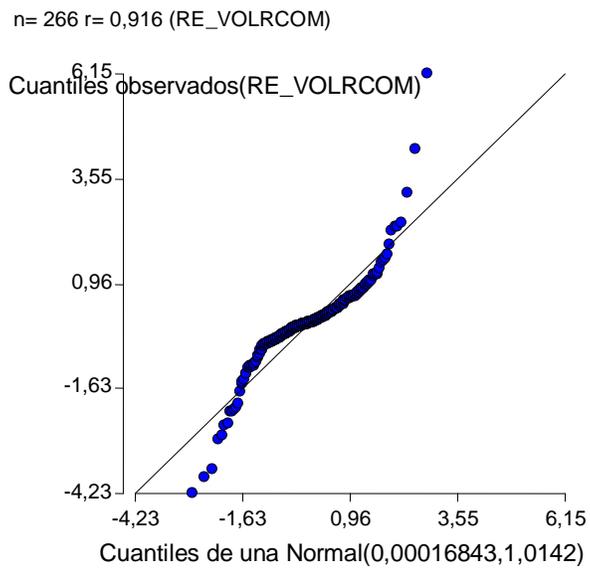
**Ilustración 21 Leverage volumen real comercial en función del caso**



**Ilustración 22 Residuos estudentizados de volumen real comercial en función de los valores predichos**



**Ilustración 23 Residuos de volumen real comercial**



**Cuadro 35 Prueba de Kolmogorov para bondad de ajuste**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
RE_VOLRCOM	Normal(0,1)	1,70E-04	1,01	266	0,16	<0,0001

**Cuadro 36 Determinación del sesgo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	-0,0026	0,0100	-0,2634	0,7947	Insesgado
b	1,0286	0,0767	0,3734	0,7125	

**Cuadro 37 Determinación de exactitud**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
36,42	36,42	Modelo inexacto	64,19

#### 4.2.2. Modelo VolRealCom= $\beta_0 + \beta_1 * HCOM * DAP^2 + \epsilon$

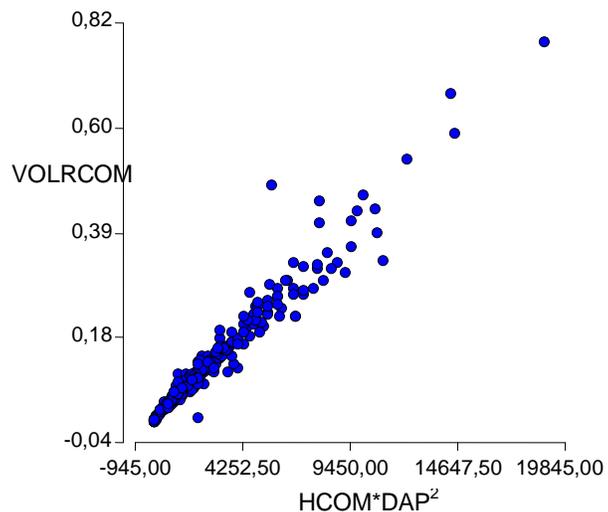
La dispersión de los datos del volumen real comercial en función del producto de la altura comercial por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado muestra, al igual que los casos anteriores, una tendencia lineal (Ilustración 24).

Realizado el análisis de regresión, se determinó un coeficiente de regresión ajustado de 0,95 y un pequeño error cuadrático medio ponderado (Cuadro 38). La Cuadro 39 presenta la estimación de los coeficientes del modelo y la Cuadro 40 indica que el modelo es altamente significativo.

La representación gráfica del modelo obtenido, sus límites de confianza y los valores observados muestran visualmente la bondad del ajuste logrado (Ilustración 25). La dispersión de los residuos estudentizados en función de los valores predichos aparenta tener cierta concentración en los menores valores (Ilustración 26). Determinado el Leverage se aprecia unos pocos casos con valores importantes (Ilustración 27). La distribución de los valores predichos con la normal no se ajusta para valores muy pequeños como para valores altos, ajustándose en los valores intermedios (Ilustración 28).

La determinación del sesgo del modelo indica que el mismo es insesgado (Cuadro 41), pero logra muy poca exactitud (solamente 36 %) (Cuadro 42).

**Ilustración 24 Volumen real comercial en función del producto de la altura comercial por el diámetro a la altura del pecho**



**Cuadro 38 Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
VOLRCOM	266	0,95	0,95	7,80E-04

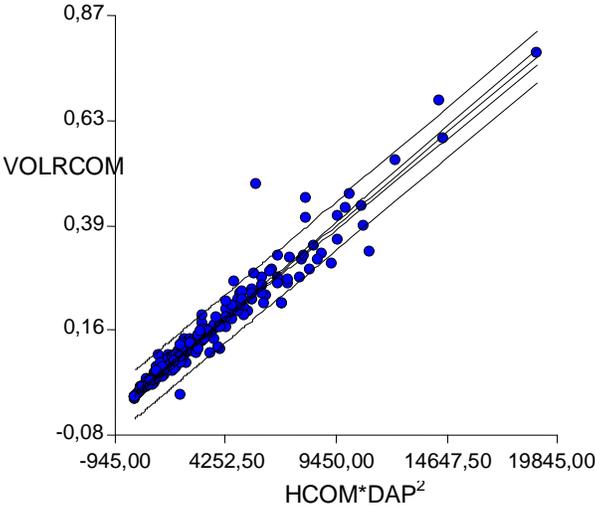
**Cuadro 39 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	0,01	2,40E-03	0,01	0,02	4,51	<0,0001	
HCOM*DAP <sup>2</sup>	4,00E-05	5,90E-07	3,90E-05	4,10E-05	68,09	<0,0001	4619,63

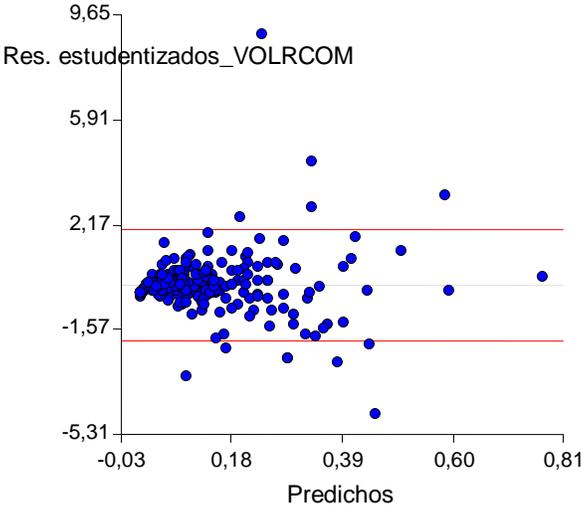
**Cuadro 40 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,52	1	3,52	4636,12	<0,0001
HCOM*DAP <sup>2</sup>	3,52	1	3,52	4636,12	<0,0001
Error	0,2	264	7,60E-04		
Total	3,72	265			

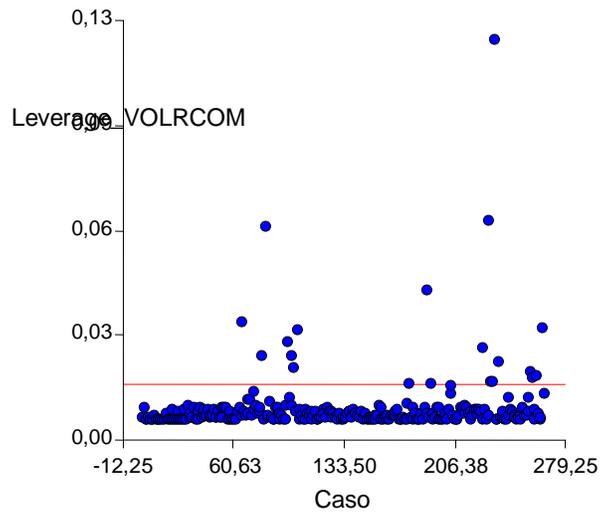
**Ilustración 25 Modelo de regresión volumen real comercial**



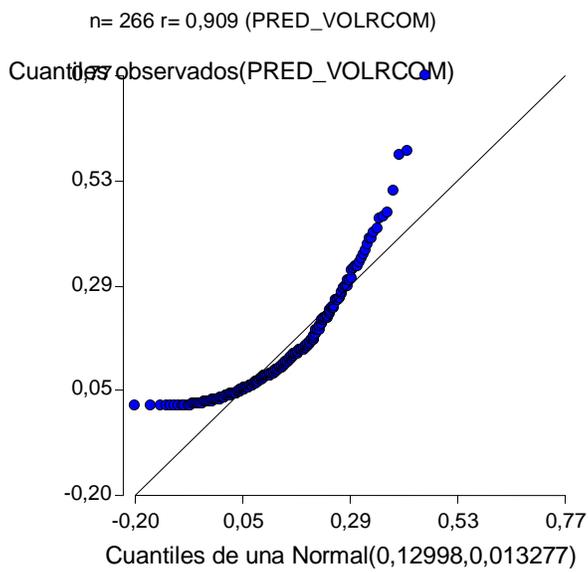
**Ilustración 26 Residuos estudentizados de volumen real comercial en función de valores predichos**



**Ilustración 27 Leverage volumen real comercial en función del caso**



**Ilustración 28 Valores predichos volumen real comercial**



**Cuadro 41 Determinación de sesgo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	-0,0035	0,0084	-0,4095	0,6861	Insesgado
b	1,0228	0,0648	0,3520	0,7282	

**Cuadro 42 Determinación de la exactitud**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
36,42	36,42	Modelo inexacto	36,49

#### 4.2.3. Modelo $\text{LnVolRealCom}=\beta_0+\beta_1*\text{LnHCOM}*DAP^2 + \varepsilon$

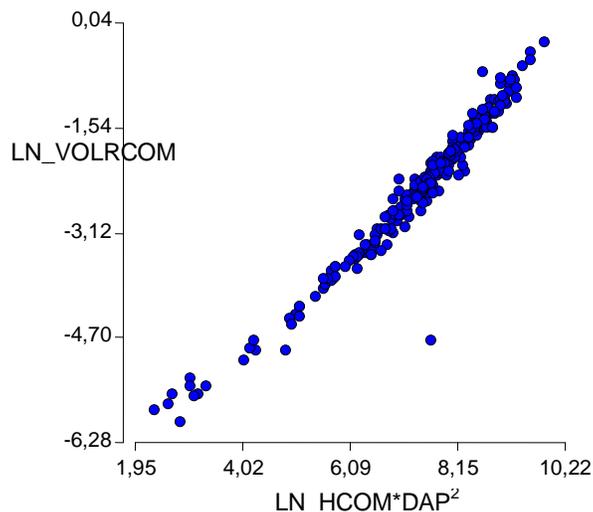
El diagrama de dispersión del logaritmo normal del volumen real comercial en función del logaritmo normal del producto de la altura comercial por el diámetro a la altura del pecho al cuadrado presenta una tendencia lineal (Ilustración 29).

Realizado el análisis de regresión se llega a determinar el coeficiente de determinación ajustado, que alcanza un valor elevado de 0,95 y un error cuadrático medio de 0,06 (Cuadro 43). La estimación de los coeficientes del modelo se presenta en la Cuadro 44 y del análisis de la varianza se puede concluir que el modelo es altamente significativo (Cuadro 45).

La representación del modelo alcanzado, con sus límites de confianza y los valores observados, muestran un buen ajuste (Ilustración 30). En el análisis de los residuos estudentizados (Ilustración 31) presenta tendencias lineales en valores pequeños y altos. La mayoría de los valores Leverage no son altos, concentrándose dentro de límites aceptables (Ilustración 32) y la distribución de los residuos con respecto a la normal, ajusta casi en forma perfecta (Ilustración 33).

El análisis del sesgo determina que el modelo es insesgado (Cuadro 47) y logra una exactitud del 78 % (Cuadro 48).

**Ilustración 29** Logaritmo normal de volumen real comercial en función del logaritmo normal del producto de altura comercial por diámetro a la altura del pecho al cuadrado



**Cuadro 43** Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
LN_VOLRCOM	264	0,95	0,95	0,06

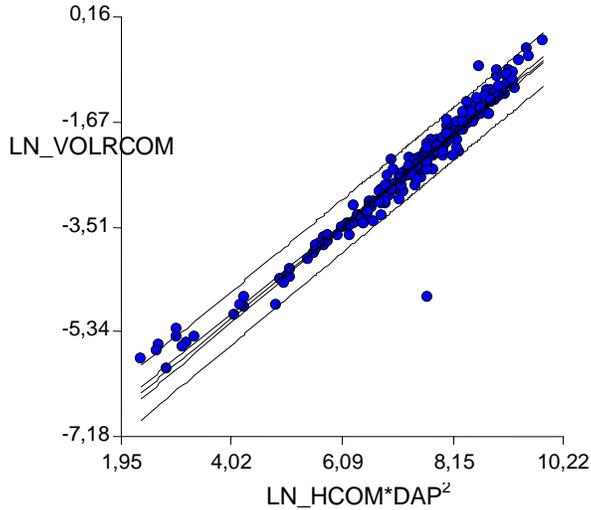
**Cuadro 44** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
const	-8,22	0,08	-8,37	-8,06	-102,89	<0,0001	
LN_HCOM*DAP <sup>2</sup>	0,77	0,01	0,75	0,79	73,12	<0,0001	5327,06

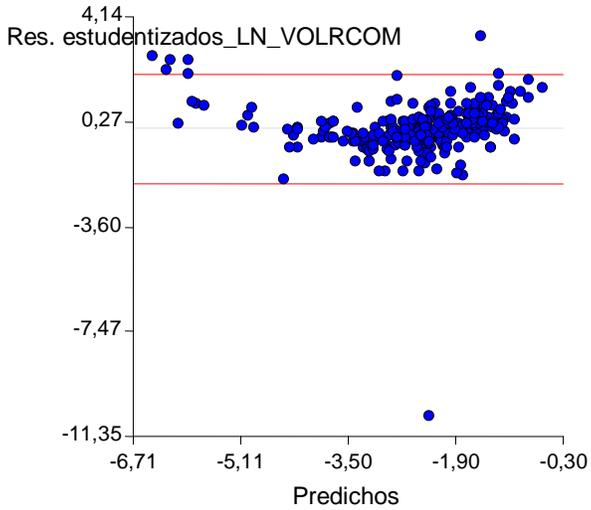
**Cuadro 45** Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	291,94	1	291,94	5346,39	<0,0001
LN_HCOM*DAP <sup>2</sup>	291,94	1	291,94	5346,39	<0,0001
Error	14,31	262	0,05		
Total	306,25	263			

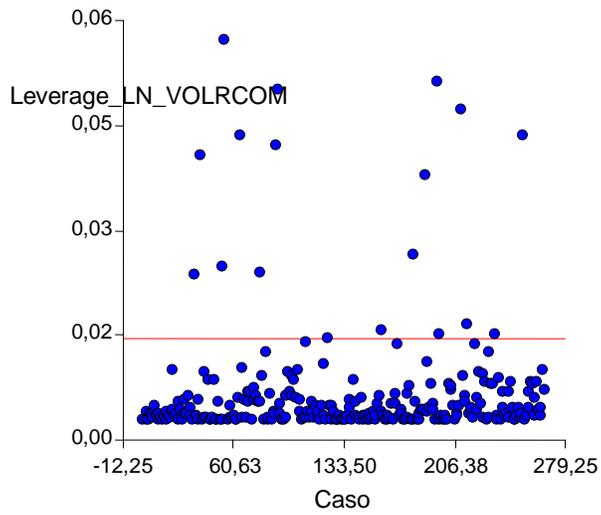
**Ilustración 30** Modelo de regresión de logaritmo natural volumen real comercial en función del logaritmo natural del producto altura comercial por diámetro a la altura del pecho al cuadrado



**Ilustración 31** Residuos estudentizados de logaritmo normal de volumen real comercial en función del caso

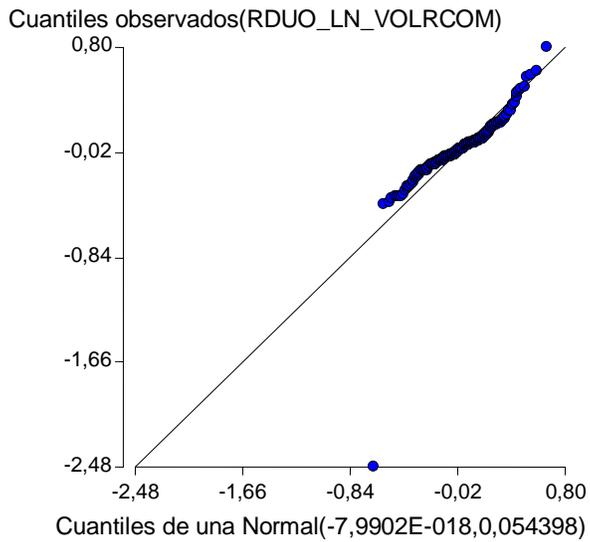


**Ilustración 32 Leverage logaritmo natural volumen real comercial en función del caso**



**Ilustración 33 Residuo de logaritmo normal volumen real comercial**

n= 264 r= 0,840 (RDUO\_LN\_VOLRCOM)



**Cuadro 46 Prueba de Kolmogorov para bondad de ajuste**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
RDUO_LN_VOLRCOM	Normal(0,1)	0	0,05	264	0,35	<0,0001

**Cuadro 47 Determinación del sesgo**

Estadígrafo	Valores	Error estándar	t	P-value	Condición
a	0,0098	0,0070	1,3902	0,1784	Insesgado
b	0,8818	0,0539	-2,1926	0,0392	

**Cuadro 48 Determinación de la exactitud**

$\chi^2$ Calculado	$\chi^2$ Tabulado	Condición	Exactitud lograda
36,42	36,42	Modelo exacto	77,95

### 4.3. TARIFAS LOCALES DE VOLUMEN TOTAL Y COMERCIAL

A continuación se presentan los principales estadígrafos descriptivos de los ajustes de los 13 sitios estudiados. En todos los sitios se obtuvo un modelo con  $R^2$  ajustado mayor a 0,9. Se alcanzaron exactitudes mayores a 70 % en 12 de los 13 sitios analizados. Sólo en las plantaciones de Pucanix tanto para volumen total como para volumen comercial se obtuvieron exactitudes menores al 62 %.

En los anexos se presenta la información completa de todos los modelos ajustados y validados.

**Cuadro 49 Modelos locales de volumen real total**

Establecimiento	Modelo	$R^2$ ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
Eufores	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,95	2,30E-04	Insesgado	86,99
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,95	1,20E-04	Insesgado	89,08
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,93	2,20E-04	Insesgado	95,42
Paso de los troncos	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,9	3,80E-04	Insesgado	72,35
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,86	5,40E-04	variable	102,20
	$V = \beta_0 + \beta_1*LN(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,75	1,70E-03	Insesgado	77,34
Canteras de Ancap	$V = \alpha*\exp(\beta*LN(H*DAP^2)) + \varepsilon$			Insesgado	72,88
	$V = \alpha*\exp(\beta*LN(H^2*DAP)) + \varepsilon$			Insesgado	57,59
	$V = \alpha*\exp(\beta*LN(H*DAP)) + \varepsilon$			Insesgado	63,21
Sauce Solo	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,94	2,60E-03	Insesgado	90,86
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,93	3,30E-03	Insesgado	88,29

Establecimiento	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2) + \varepsilon$	0,91	4,00E-03	Insesgado	85,96
Soca	$V = \beta_0 + \beta_1 * AB) + \varepsilon$	0,98	5,10E-04	Insesgado	93,62
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2) + \varepsilon$	0,98	5,10E-04	Insesgado	93,68
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,98	4,50E-04	Insesgado	93,21
La Mariana	$V = \beta_0 + \beta_1 * (HCOM * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,94	1,70E-04	variable	95,10
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (HCOM^2 * DAP) ) + \varepsilon$	0,94	1,70E-04	Insesgado	86,78
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,92	2,20E-04	variable	95,73
Barriga Negra	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln(H * DAP) ) + \varepsilon$	0,98	0,01	Insesgado	91,59
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,96	2,00E-04	Insesgado	87,66
	$V = \beta_0 + \beta_1 * AB) + \varepsilon$	0,93	2,80E-04	Insesgado	77,13
Palmares	$V = \beta_0 + \beta_1 * AB) + \varepsilon$	0,99	3,10E-04	Insesgado	91,42
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2) + \varepsilon$	0,99	3,20E-04	Insesgado	88,66
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,99	2,70E-04	Insesgado	81,83
María Albina	$V = \beta_0 + \beta_1 * AB) + \varepsilon$	0,97	3,90E-04	Insesgado	77,96
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2) + \varepsilon$	0,97	3,90E-04	Insesgado	78,02
	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) ) + \varepsilon$	0,97	2,60E-04	Insesgado	94,21
India Muerta	$V = \beta_0 + \beta_1 * AB) + \varepsilon$	0,98	2,30E-04	Insesgado	51,83
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2) + \varepsilon$	0,98	2,30E-04	Insesgado	51,99
	$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^3) + \varepsilon$	0,98	2,40E-04	Insesgado	82,17
Pucanix	$V = \beta_0 + \beta_1 * (H^2 * DAP) ) + \varepsilon$	0,98	1,10E-03	Insesgado	18,11

Establecimiento	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,98	1,30E-03	Insesgado	51,93
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,96	2,60E-03	Insesgado	43,86
Mailhos	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,98	1,40E-04	Insesgado	85,99
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,96	2,30E-04	Insesgado	75,80
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,93	4,50E-04	Insesgado	78,88
Mi Refugio	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,98	5,70E-04	Insesgado	80,66
	$V = \beta_0 + \beta_1*AB + \varepsilon$	0,95	1,50E-03	Insesgado	90,20
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP + \varepsilon$	0,93	2,20E-03	Insesgado	59,33

**Cuadro 50 Modelos locales volumen real comercial**

Establecimiento	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
Eufores	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,95	1,20E-04	Insesgado	89,35
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,94	1,90E-04	Insesgado	90,56
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,93	2,30E-04	Insesgado	89,85
Paso de los troncos	$\ln V = \beta_0 + \beta_1*\ln(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,95	0,03	Insesgado	72,35
	$\ln V = \beta_0 + \beta_1*\ln(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,92	0,03	Variable	100,00
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,9	3,90E-04	Insesgado	77,34
Canteras de Ancap	$\ln V = \beta_0 + \beta_1*\ln(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,97	0,04	Insesgado	84,07
	$\ln V = \beta_0 + \beta_1*\ln(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,95	0,06	Insesgado	80,12
	$\ln V = \beta_0 + \beta_1*\ln(HCOM*DAP) + \varepsilon$	0,96	0,05	Variable	100,00
Sauce Solo	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,93	3,10E-03	Insesgado	38,84
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,91	3,90E-03	Insesgado	54,50
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^2 + \varepsilon$	0,9	4,70E-03	Insesgado	78,15
Soca	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^2 + \varepsilon$	0,98	5,10E-04	Insesgado	92,47
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,98	4,60E-04	Insesgado	92,80
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^3 + \varepsilon$	0,97	7,30E-04	Insesgado	92,30
La Mariana	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,94	1,70E-04	Insesgado	86,27

Establecimiento	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,94	1,70E-04	Insesgado	79,30
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,92	2,20E-04	Insesgado	83,91
Barriga Negra	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,96	2,00E-04	Insesgado	83,08
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,96	1,90E-04	Insesgado	84,63
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,96	1,80E-04	Insesgado	88,44
Palmares	$V = \beta_0 + \beta_1*AB + \varepsilon$	0,99	3,00E-04	Insesgado	81,37
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^2 + \varepsilon$	0,99	3,10E-04	Insesgado	81,53
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,99	2,70E-04	Insesgado	89,09
María Albina	$V = \beta_0 + \beta_1*AB + \varepsilon$	0,97	3,90E-04	Insesgado	82,11
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,97	2,80E-04	Insesgado	38,14
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM*DAP^2) + \varepsilon$	0,97	2,90E-04	Insesgado	8,01
India Muerta	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^2 + \varepsilon$	0,98	2,40E-04	Insesgado	74,27
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP^3 + \varepsilon$	0,98	2,60E-04	Insesgado	88,63
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP + \varepsilon$	0,93	7,80E-04	Insesgado	28,95
Pucanix	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,98	1,70E-03	Insesgado	57,84
	$V = \beta_0 + \beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$	0,98	1,20E-03	Insesgado	61,79
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,95	3,90E-03	Insesgado	53,98
Mailhos	$V = \beta_0 +$	0,98	1,50E-	Insesgado	89,06

Establecimiento	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
	$\beta_1*(HCOM^2*DAP) + \varepsilon$		04		
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,96	2,40E-04	Insesgado	53,19
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H^2*DAP) + \varepsilon$	0,93	4,70E-04	Insesgado	83,19
Mi Refugio	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP) + \varepsilon$	0,98	5,90E-04	Insesgado	92,93
	$V = \beta_0 + \beta_1*(H*DAP^2) + \varepsilon$	0,96	1,10E-03	Insesgado	94,73
	$V = \beta_0 + \beta_1*DAP + \varepsilon$	0,93	2,10E-03	Insesgado	53,08

## **5. DISCUSIÓN**

Se elaboraron funciones de volumen para *Eucalyptus globulus ssp. globulus* en la zona sur del Uruguay que permiten obtener el volumen comercial y volumen total, para toda la región sur del Río Negro como para los sitios en los cuales se realizaron las mediciones.

Se lograron ajustar los modelos de regresión en cada uno de los sitios y a nivel de la región con altos valores del coeficiente de determinación ajustado y bajos errores cuadráticos medios. Los coeficientes de determinación ajustados variaron entre 0,92 a 0,98 para los modelos generales que permiten determinar volumen real total y de 0,95 a 0,96 para los modelos generales que determinan volumen real comercial.

A pesar de lo mencionado anteriormente, una vez realizada la validación de los modelos, la determinación del sesgo y de la exactitud lograda, muchos de ellos no logran una exactitud muy buena. La validación de los modelos en la mayoría de los casos logró una exactitud mayor al 70% para los modelos totales y comerciales de aplicación general, cumpliendo de esta manera con los objetivos del trabajo (Cuadros 51, y 52).

Los modelos que superaron la validación y que alcanzaron el 70 % de exactitud, así como los restantes modelos, presentaron coeficientes de determinación ajustados elevados con valores de 0,92 a 0,98 para los modelos generales que permiten determinar volumen real total y de 0,95 a 0,96 para los modelos generales que determinan volumen real comercial.

Los modelos de aplicación local, tanto para volumen total como para volumen comercial alcanzaron exactitudes mayores a 70 % en 12 de los 13 sitios estudiados. Los valores del coeficiente de determinación ajustado fueron altos en todos los casos, aún en aquellos que no superaron la prueba de validación. Dicho valor fue superior a 0,9, presentando errores cuadráticos medios muy bajos (Cuadros 49 y 50).

**Cuadro 51 Modelos generales de volumen real total**

Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) + \varepsilon$	0,96	5,50E-04	Insesgado	58,04
$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln(H * DAP^2) + \varepsilon$	0,98	0,02	Variable	72,83
$V = \beta_0 + \beta_1 * (H^2 * DAP) + \varepsilon$	0,92	1,10E-03	Constante	32,81

**Cuadro 52 Modelos generales de volumen real comercialmercial**

Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Sesgo	Exactitud
$V = \beta_0 + \beta_1 * (H * DAP^2) + \varepsilon$	0,96	6,30E-04	Insesgado	64,19
$V = \beta_0 + \beta_1 * (HCOM * DAP^2) + \varepsilon$	0,95	7,80E-04	Insesgado	36,49
$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln(HCOM * DAP^2) + \varepsilon$	0,95	0,06	Insesgado	77,95

## **7. CONCLUSIONES**

Se logró obtener modelos de fácil aplicación para las tablas de volumen general total y comercial de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* en la zona sur del Uruguay. También se obtuvieron modelos aplicables a nivel de zonas restrictas como lo son las tablas de volumen local para volumen total y comercial en 13 diferentes zonas.

Los modelos ajustados para la elaboración de tablas de volumen general (sur del Río Negro) para volumen comercial y local alcanzaron un valor de predicción superior al 70 % en la validación, por lo que pueden ser utilizados en el sur del país para predecir los rendimientos con una predicción aceptable a la escala de trabajo.

En los modelos locales ajustados para 12 sitios obtuvieron un valor superior a 70% en la validación, por lo que pueden ser utilizados para estimar los rendimientos de las plantaciones en dichos sitios. Solo en un sitio (Pucanix), no se alcanzó la exactitud considerada límite, por lo que no se recomienda el uso de dichos modelos para ese sitio.

De esta manera se logró el objetivo del trabajo, donde los modelos obtenidos permitirán obtener resultados precisos de las plantaciones de forma de realizar predicciones para cosechas o manejos sustentables de los bosques que utilizan la especie estudiada.

Como futuras líneas de investigación sería importante seguir con la construcción de tablas de volumen para otras especies de rápido crecimiento utilizadas en el país, como ser *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunii*, *Eucalyptus globulus ssp. maidenii* y materializar dichos modelos matemáticos en software de simulación que permitiría obtener predicciones de crecimiento y regular cortas y suministros de materia prima.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Alder D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Predicción del rendimiento, Vol 22/2. FAO: Montes. 198 pp.
- Balmelli G.; Resquin F.; Altier N.; Marrón V. 2006. Evaluación sanitaria, productiva y de propiedades de madera de diferentes orígenes de *Eucalyptus globulus* a los 11 años. Serie actividades de difusión. Uruguay. INIA. N°. 462. 35p.
- Bruce, D., Schumacher. F. 1965. Medición Forestal. México, Herrero, 474p.
- Caillez F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol 22/1. FAO: Montes. 92 pp.
- Freese, F. 1960. Testing Accuracy. New Orleans. Biometrician at the Southern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, La. Volume 6, number 2.7p.
- Fucaraccio, F.; Staffieri G.; Wabo, E. 1992. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina. Tesis Ingeniero Agrónomo. La Plata, Argentina, Universidad Nacional de la Plata – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 27p.
- Husch B, Miller Ch, Beers T. 1982. Forest Mensuration. 3a edición, 402 pp.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2004. Boletín Estadístico. Montevideo. Dirección General Forestal. Año 4 Número 3. 44p.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 1996. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Montevideo. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra. Indices de Productividad, Grupos CONEAT. 80p.
- Moraga V. 1997. Construcción de funciones de volumen para dos clones de álamo. Tesis. Chile. Universidad de Talca. 96 p.
- Prodan, M., P. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. IICA, BMZ y GTZ. 586 p.

- Sorrentino, A. 1990. Manual Teórico – Práctico. Técnicas e instrumentos de medición forestal. Montevideo. Facultad de Agronomía. Volumen 2. 212p.
- Steel, R. G. D.; Torrie, J. H.. 1985. Bioestadística, principios y procedimientos. Bogotá : McGraw-Hill, 622 p.
- Torres, J. 1998. Niveles porcentuales de muestra asignados a la construcción y validación de una función de volumen para *Eucalyptus globulus*. Tesis Licenciado en Ciencias Forestales. Chile. Talca. Universidad de Talca. 83p.
- Vargas, F. 1999. Uso de variables indicadoras para determinar funciones de volumen en *Nothofagus oblicua* (Mirbel), en la VII Región. Tesis Licenciado en Ciencias Forestales. Chile. Talca. Universidad de Talca. 158p.

## **9. ANEXO**

### **TABLAS DE VOLUMEN PARA ÁRBOLES INDIVIDUALES DE *Eucalyptus globulus ssp. globulus* CULTIVADOS EN LA REGIÓN SUR DE URUGUAY<sup>1</sup>**

Morás Guillermo<sup>1</sup> Vallejos Barra Oscar Santiago<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Agronomía, Av. E. Garzón 780. CP 12900. Montevideo. Uruguay.

[gmoras@fagro.edu.uy](mailto:gmoras@fagro.edu.uy).

<sup>2</sup>Universidad de Talca, 2 Norte 685. Talca. Chile.

[ovallejo@utalca.cl](mailto:ovallejo@utalca.cl)

---

<sup>1</sup> Artículo escrito de acuerdo a las normas para autores de la revista Agrociencia Uruguay.

## Resumen

Se desarrollaron tablas de volumen individual total y comercial para *Eucalyptus globulus ssp. globulus* pertenecientes a plantaciones comerciales del sur de Uruguay, ubicadas en 13 establecimientos con edades entre 6 y 11 años, con una densidad de plantación entre 1111 y 1667 ejemplares por hectárea. Se seleccionaron al azar 266 árboles a los cuales se les midió en pie el DAP con corteza, utilizando una forcípula de brazos paralelos. Los árboles fueron apeados y la altura se registró con una cinta métrica. A cada un metro de largo se midió el diámetro y se calculó el volumen con la fórmula de Smalian, el volumen del árbol se obtuvo al adicionar los volúmenes de las secciones. Se determinaron las variables más correlacionadas con el volumen total y comercial y con ellas se construyeron los modelos matemáticos. Estos fueron seleccionados considerando el mayor  $R^2$  ajustado y el menor ECMP. El volumen total con corteza es estimado por [  $\text{Ln}(\text{Volumen total}) = -9,75 + 0,93 * \text{Ln} (\text{DAP}^2 * \text{h total}) + \varepsilon$  ] con un  $R^2$  ajustado de 0,98 y un ECMP de 0,02. El volumen comercial con corteza es estimado por [  $\text{Ln}(\text{Volumen comercial}) = -8,22 + 0,77 * \text{Ln} (\text{DAP}^2 * \text{h comercial}) + \varepsilon$  ] con un  $R^2$  ajustado de 0,95 y un ECMP de 0,06. Para cada uno de los establecimientos se seleccionaron las funciones locales de mayor significancia tanto del volumen total como comercial.

**Palabras clave:** modelos forestales, funciones de volumen, *Eucalyptus*, *Eucalyptus globulus*

## Summary

### **TABLES OF VOLUME FOR INDIVIDUAL TREES IN *Eucalyptus globulus ssp. globulus* IN URUGUAY**

The volume of individual tables allow the identification of wood from each of the individuals according to the measurement of a few attributes and easier to measure in the trees. In order to determine individual boards of trade volume and total volume of application for the region or locally, were used copies belonging to commercial plantations of *Eucalyptus globulus ssp. globulus* located south of Uruguay. To conduct the study alighted trees in the Departments of San Jose, Montevideo, Canelones, Lavalleja and Rocha, in a state stem, but two cases in which forests were to sprout, with densities of trees from 1111 to 1667 individuals per hectare. Based on the characteristics: diameter at breast height and height commercial and total height, which were identified were those variables most correlated with the variable interest (total volume, trading volume); with these variables were constructed mathematical models that best adjustment showed. The models were evaluated based on the adjusted coefficient of determination showed that higher value and lower mean square error. Each one of the best models it determined the type of bias, and then calculated the level of confidence from it. It was possible to identify different mathematical models that helped develop tables of general application and for local trade volume and total volume with bark, dominated models where the independent variable is the diameter at breast height and a height of the shaft.

**Key words:** forestry models, volume function, *Eucalyptus*, *Eucalyptus globulus*

## Introducción

La gran demanda para la producción de pulpa y papel de la madera de *Eucalyptus globulus* en el mercado internacional, ha llevado a que esta especie sea la de mayor superficie plantada en Uruguay, con más de 250 mil hectáreas (MGAP, 2004). La mayor parte de las plantaciones realizadas con esta especie han utilizado semillas importadas principalmente de Chile, España y Australia. En general las semillas han sido recolectadas de rodales que no tienen mejoramiento genético o que han sido mejorados para condiciones diferentes a las presentes en Uruguay. Según Balmelli *et al.* (2006) en los ensayos de orígenes de semillas se ha reportado que el mejor origen corresponde al proveniente de Jeeralang North (Australia). Este origen tiene mayor tasa de crecimiento, mayor calidad sanitaria y mayor rendimiento de pulpa por unidad de superficie.

La correcta preparación del suelo, fertilización y control de malezas, son factores que influyen fuertemente para tener un alto vigor inicial que redundará en bajas tasas de mortalidad por efecto de factores ambientales (heladas) y bióticos (defoliación) (Balmelli, *et al.* 2006).

La cuantificación del volumen de los árboles se realiza mediante una tabla de volumen que según Cailleux (1980) corresponde a la forma de estimar el volumen de los árboles a través de un modelo matemático, lo cual se expresa de manera gráfica, en forma tabular o bien como una función matemática. Se estima el volumen de un árbol en función de variables predictoras, de fácil medición en terreno.

Las primeras tablas de volumen fueron construidas por Heinrich Cotta, a inicios del siglo pasado, para la especie *Fagus sylvatica*, identificando que el volumen individual se relacionaba con la altura de los árboles (Prodan, 1997). Con la masificación de computadores personales se ha facilitado en las últimas décadas la elaboración de las tablas de volumen, expresadas como una

función matemática, con mayor número de datos y variables predictivas del volumen (Prodan, 1997).

En la actualidad se acude habitualmente a métodos estadísticos para poder estimar el volumen total y comercial de los árboles. Frecuentemente se utiliza el método de los mínimos cuadrados, que genera la curva más verosímil y por consiguiente, su localización más probable. Así la curva tiene la menor suma de los residuos (diferencia entre el valor observado y el valor estimado) elevados al cuadrado, lo que permitirá un error normal más pequeño posible (Bruce y Schumacher, 1965).

Una vez ajustada la curva se deben comprobar los supuestos que considera el método de los mínimos cuadrados (Steel & Torrie, 1985). Se debe probar la normalidad, la homocedasticidad y la no multicolinealidad. La normalidad supone que cada residuo está distribuido normalmente con un valor esperado igual a cero, una varianza constante y que no estén correlacionados. Frecuentemente se utiliza el test Shapiro – Wilks para comprobar la normalidad de los residuos. Si no se cumple la homocedasticidad, igual varianza entre los residuos, entonces los estimadores no son de varianza mínima y por lo tanto no son eficientes (heterocedasticidad). El test de Bartlett, detecta la presencia o ausencia de heterocedasticidad y si esta es significativa. Caillez (1980) indica que este supuesto generalmente no se cumple en el caso de la construcción de funciones de volumen, debido a que la varianza del volumen aumenta a medida que lo hace el tamaño de los árboles. Una forma de solucionar el incumplimiento de este supuesto es utilizar transformaciones de la variable volumen. Finalmente interesa que no se presente multicolinealidad entre las variables explicativas, ya que de existir una perfecta colinealidad entre estas variables sus coeficientes se indeterminan y los errores estándar son infinitos. Si la colinealidad es alta, pero no perfecta, la estimación de coeficientes es posible, pero los errores estándar tienden a ser grandes y

los valores poblacionales de los coeficientes no pueden estimarse en forma precisa. El signo más claro de la existencia de multicolinealidad es un coeficiente de determinación muy alto, pero ninguno de los coeficientes de regresión estadísticamente significativo. Para solucionar el problema de la multicolinealidad se debe omitir una variable altamente colineal o bien transformar las variables.

Comprobados los supuestos se procede a validar la función matemática, para determinar si esta representa fielmente la realidad (Alder, 1980). Se recomienda realizar una validación independiente, es decir los datos usados para la validación no forman parte de los que se utilizaron para estimar sus parámetros. Debido a que en algunos establecimientos la cantidad de muestras obtenidas no era muy grande, se decidió optar por la autovalidación. El esfuerzo puesto en los procesos de validación de las funciones matemáticas, de ninguna manera es superfluo. Así se pueden demostrar debilidades en su comportamiento, lo cual conducirá a mejorar la estructura o a la necesidad de recolectar más datos de campo (Alder, 1980). En el proceso de validación, lo primero es determinar la naturaleza del sesgo entre los valores estimados y los valores observados, mediante una prueba t – student. Lo segundo, corresponde aplicar el test de Freese (1960) para evaluar la exactitud del modelo.

Consiente de la necesidad de desarrollar tablas de volumen generales y locales, tanto para volumen total como para volumen comercial con corteza para *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* en la zona sur del Uruguay se llevó a cabo esta investigación. Estas tablas de volumen servirán para la cuantificación volumétrica del patrimonio de empresas o particulares en la zona comprendida por los departamentos de San José, Montevideo, Canelones, Lavalleja y Rocha.

## Materiales y métodos

Se seleccionaron 13 establecimientos para obtener la muestra de 266 árboles que esta investigación consideró. Las características de ubicación (latitud y longitud) y altitud sobre el nivel del mar se detallan en la Cuadro 1

**Cuadro 1 Ubicación de los diferentes establecimientos**

Establecimiento	Latitud	Longitud	Altura sobre el nivel del mar (m)
1 San José (Palmares de San Gregorio)	34° 41' 09'' S	56° 45' 97'' W	20
2 Montevideo (Mailhos)	34° 49' 53'' S	56° 23' 30'' W	27
3 Canelones 1 (Soca s.a)	34° 39' 35'' S	55° 36' 07'' W	86
4 Canelones 2 (Puig)	34° 39' 52'' S	55° 34' 05'' W	57
5 Canelones 3 (Sauce Solo)	34° 27' 03'' S	55° 34' 40'' W	65
6 Lavalleja 1 (Canteras Ancap)	34° 25' 37'' S	55° 16' 10'' W	179
7 Lavalleja 2 (Mi Refugio s.a)	34° 12' 53'' S	55° 17' 11'' W	186
8 Lavalleja 3 (Pucanix)	34° 05' 53'' S	55° 10' 44'' W	160
9 Lavalleja 4 (Paso de los troncos)	34° 07' 12'' S	54° 56' 46'' W	195
10 Lavalleja 5 (Barriga Negra)	34° 14' 45'' S	55° 09' 51'' W	175
11 Lavalleja 6 (María Albina)	33° 35' 07'' S	54° 45' 32'' W	216
12 Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	34° 25' 21'' S	55° 08' 33'' W	267
13 Rocha (India Muerta)	34° 02' 17'' S	54° 13' 08'' W	89

En cada uno de los establecimientos se seleccionaron parcelas que fueran representativas, correspondiendo a sitios favorables para el desarrollo de la especie. Los instrumentos utilizados para la medición de los árboles fueron: forcípula de 80 cm, con una precisión al milímetro, cinta métrica de 50 m, con una precisión al milímetro. Para el apeo de los árboles se utilizó una

motosierra Husqvarna 040. En terreno se cubrió toda la gama de condiciones presentes en los establecimientos. Los árboles que fueron apeados estaban ubicados dentro de cada parcela, por lo que el método de selección fue el azar, mientras se cumpliera que los árboles tuvieran fustes rectos.

Las variables registradas en terreno corresponden al diámetro a la altura del pecho (DAP) con corteza, medición que se hace a 1,3 metros medido desde el suelo, si los árboles provienen de un monte fustal y medido desde la base del tocón anterior, si provienen de un monte tallar. Una vez apeado el árbol, se extendió la cinta métrica sobre el fuste, determinándose la altura total en el suelo y luego se midieron los diámetros cada un metro de largo hasta el total de fuste medible, hasta 1 cm de diámetro como mínimo. Para la cubicación de cada troza se utilizó la fórmula de Smalian para el volumen de conoides truncados [  $V = \pi / 8 * (D^2 + d^2) * L$  ]

Donde:

V: Volumen cúbico con corteza.

D: Diámetro en la cara inferior con corteza en metros.

d: Diámetro en la cara superior con corteza en metros.

L: Largo de la troza en metros.

Una vez estimado el volumen de cada troza, se determinó el volumen de cada árbol como la suma de las trozas del árbol correspondiente. Para preseleccionar los modelos de regresión lineal posibles, se confeccionó una matriz de correlación y gráficos XY donde se cruzaron todas las variables, verificando la correlación entre variables independientes y la correlación entre pares de variables independientes – dependiente incluidas en algún modelo preestablecido. De esta manera se determinaron las posibles variables a incorporar y eliminar por alta correlación en el modelo.

El ajuste y prueba de los modelos se realizó con el programa estadístico Infostat, verificando los supuestos del modelo de regresión lineal y determinando la significancia estadística de los coeficientes de regresión. Para determinar el modelo definitivo que se seleccionó se utilizó el  $R^2$  ajustado, optando por aquel modelo que presentó el mayor  $R^2$  ajustado de entre todos los modelos que cumplieron los supuestos, y a igual  $R^2$  ajustado, se seleccionó aquel modelo que tuviera el error cuadrático medio menor.

En la obtención de los intervalos de confianza tanto para valores medios como para valores individuales, se obtuvieron en primer lugar los errores estándar para un determinado valor de la variable explicativa. Luego con el valor obtenido del error estándar y el valor de t correspondiente, se determinó el error de muestreo para un nivel de significancia del 5%, con lo cual se elaboraron los intervalos de confianza.

## **Resultados**

Para el ajuste de los modelos se utilizaron todos los datos tomados en el campo, en el caso particular de las tablas de volumen fueron el volumen total y volumen comercial hasta 5 cm de diámetro mínimo. Dichas variables se correlacionaron con el diámetro a la altura del pecho (DAP),  $DAP^2$ ,  $DAP^3$ ,  $DAP^2*HT$ ,  $DAP*HT^2$  o algunas de las combinaciones que se presentan en la bibliografía (Cuadro 2 y 3). De todos aquellos modelos obtenidos, se seleccionaron aquellos con mayor variables aportaban más a los modelos, pero también se seleccionaron aquellos modelos que fueran lo más sencillos posibles. Para comparar la calidad de ajuste de los modelos se tomó en cuenta el coeficiente de determinación ajustado y el error cuadrático medio.

La validación de los modelos fue realizada en base a una muestra tomada al azar de la misma muestra utilizada para generar el modelo, a lo que se denomina como auto validación, utilizando el método de Freeze modificado por Vallejos.

**Cuadro 2 Clasificación matemática y dasométrica de los modelos**

Modelos	Clasificación	
	Regresión	Dasométrica
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \varepsilon$	Polinomial (grado 1)	Sin clasificar
$V = \beta_0 * DAP^2 + \varepsilon$	Polinomial (grado 2)	Bertkhoust
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon$		Kopezky – Gehrhardt
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon$		Dissescu-Meyer
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + c * DAP^2 + \varepsilon$		Hoernald-Kren
$V = \beta_0 * DAP^3 + \varepsilon$	Polinomial (grado 3)	Sin clasificar
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^3 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^3 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Variable combinada
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * HT + \varepsilon$		Variable combinada generalizada
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP * HT + \beta_3 * DAP^2 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 * HT + \beta_3 * HT + \varepsilon$		
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 * HT + \beta_3 * DAP * HT^2 + \beta_4 * HT^2 + \varepsilon$		
$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} + \varepsilon$	Potencial	Sin clasificar
$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * HT^c + \varepsilon$	Potencial con variable combinada	Schumacher-Hall
$V = \beta_0 * (DAP^2 * HT)^{\beta_1} + \varepsilon$		Logarítmico sin intercepto y variable combinada
$V = \beta_0 + \beta_1 * \log DAP + \beta_2 * \log HT + \varepsilon$		Logarítmico sin intercepto
$V = (\beta_0 \text{ SITIO}^{\beta_1}) * ((DAP)^{\beta_2 (\text{Sitio})^{\beta_3}}) + \varepsilon$		Exponencial
$\ln V = \beta_0 * \ln DAP + \beta_1 1 / DAP + \varepsilon$	Potencial	Brenac reducido

Fuente: Fucaraccio *et al.*, 1992

**Cuadro 3 Otros modelos citados por la bibliografía**

Modelo	Clasificación	
	Regresión	Dasométrica
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Spurr
$V = \beta_0 + \beta_1 * \ln (DAP^2 * HT) + \varepsilon$	Potencial con variable combinada	Spurr
$V = \beta_0 + \beta_1 v DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^2 * HT + e * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada	Stoate
$V = DAP^2 * (\beta_0 + \beta_1 * DAP * HT) + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 3)	Ogaya
$V = DAP * (\beta_0 + \beta_1 * DAP * HT) + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Ogaya modificado
$V = \beta_0 * DAP^2 + \beta_1 * DAP^2 * HT + \beta_2 * DAP * HT^2 + \beta_3 * HT^2 + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Naslund
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP * HT + \beta_4 * DAP^2 * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Meyer
$V = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP^2 * HT + \beta_4 * DAP * HT^2 + f * HT + \varepsilon$	Polinomial con variable combinada (grado 2)	Meyer
$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln DAP + \beta_2 * 1 / DAP + \varepsilon$	Logarítmico	Brenac

Fuente: Fucaraccio *et al.*, (1992)

El estado silvicultural, volumen por unidad de superficie y densidad de individuos son los que se detallan en la Cuadro 4.

**Cuadro 4 Características silviculturales y densidad según establecimiento**

Establecimiento	Estado silvicultural	Volumen (m <sup>3</sup> /ha)	N/ha
1 San José (Palmares de San Gregorio)	Fustal	156,7	1429
2 Montevideo (Mailhos)		103,0	1667
3 Canelones 1 (Soca s.a)		137,9	1667
4 Canelones 2 (Puig)	Rebrote	174,6	1250
5 Canelones 3 (Sauce Solo)	Fustal	191,6	1111
6 Lavalleja 1 (Canteras Ancap)		48,9	1667

7 Lavalleja 2 (Mi Refugio s.a)		133,1	1250
8 Lavalleja 3 (Pucanix)		188,6	1667
9 Lavalleja 4 (Paso de los troncos)		118,9	1667
10 Lavalleja 5 (Barriga Negra)		148,5	1667
11 Lavalleja 6 (María Albina)		60,7	1111
12 Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	Rebrote	79,2	1667
13 Rocha (India Muerta)	Fustal	84,9	1250

Las principales características dasométricas de los individuos utilizados se presentan en la Cuadro 5, donde se detalla la estadística descriptiva del diámetro a la altura del pecho, altura total, altura comercial, volumen real total y volumen real comercial. Los parámetros que se presentan para la descripción son: la media, desvío estándar, varianza, error estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo.

**Cuadro 5 Estadística descriptiva de Diámetro a la altura del pecho, altura total, altura comercial, volumen real total y volumen real comercial**

Establecimiento	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	E.E.	CV	Mín	Máx
Barriga Negra	DAP	25	14,08	3,47	12,02	0,69	24,63	6,5	19,5
Barriga Negra	HTOTAL	25	16,01	2,49	6,2	0,5	15,55	9,36	19,65
Barriga Negra	HCOM	25	11,84	3,22	10,39	0,64	27,22	3	16
Barriga Negra	VOLRTOT	25	0,12	0,06	3,50E-03	0,01	49,76	0,01	0,22
Barriga Negra	VOLRCOM	25	0,12	0,06	3,60E-03	0,01	50,71	0,01	0,22
C Ancap	DAP	33	11,61	4,23	17,92	0,74	36,46	3,2	18,3
C Ancap	HTOTAL	33	10,57	2,42	5,87	0,42	22,93	5,26	13,95
C Ancap	HCOM	33	6,3	3,05	9,28	0,53	48,33	0	11
C Ancap	VOLRTOT	33	0,06	0,04	1,50E-03	0,01	65,2	3,90E-03	0,14
C Ancap	VOLRCOM	33	0,06	0,04	1,50E-03	0,01	67,17	1,60E-03	0,13
Eufores	DAP	14	14,49	3,62	13,13	0,97	25	4	19,6
Eufores	HTOTAL	14	14,92	2,53	6,42	0,68	16,98	6,8	17,65

Eufores	HCOM	14	10,5	3,25	10,58	0,87	30,97	0	14
Eufores	VOLRTOT	14	0,11	0,04	1,80E-03	0,01	37,77	4,00E-03	0,18
Eufores	VOLRCOM	14	0,11	0,04	1,90E-03	0,01	38,77	0	0,18
India Muerta	DAP	16	13,33	5,54	30,69	1,39	41,56	4,1	20,7
India Muerta	HTOTAL	16	12,78	3,58	12,84	0,9	28,04	5,29	16,73
India Muerta	HCOM	16	8,56	3,98	15,86	1	46,51	1	14
India Muerta	VOLRTOT	16	0,11	0,09	0,01	0,02	85,03	4,30E-03	0,27
India Muerta	VOLRCOM	16	0,11	0,09	0,01	0,02	86,4	2,50E-03	0,27
La Mariana	DAP	46	11,54	3,04	9,22	0,45	26,31	5,8	19
La Mariana	HTOTAL	46	14,92	1,97	3,86	0,29	13,18	10,51	17,66
La Mariana	HCOM	46	10,26	2,67	7,13	0,39	26,02	4	14
La Mariana	VOLRTOT	46	0,08	0,05	2,20E-03	0,01	62,05	0,02	0,24
La Mariana	VOLRCOM	46	0,07	0,05	2,30E-03	0,01	64,34	0,01	0,24
Mailhos	DAP	20	13,54	4,68	21,86	1,05	34,53	4,5	23
Mailhos	HTOTAL	20	13,58	3,49	12,16	0,78	25,68	5,83	20,2
Mailhos	HCOM	20	9,75	3,58	12,83	0,8	36,74	1	13
Mailhos	VOLRTOT	20	0,1	0,07	4,90E-03	0,02	67,68	0,01	0,22
Mailhos	VOLRCOM	20	0,1	0,07	4,90E-03	0,02	68,76	4,40E-03	0,22
Maria Albina	DAP	12	14,28	6,17	38,03	1,78	43,17	3,7	24,5
Maria Albina	HTOTAL	12	11,47	3,16	9,96	0,91	27,5	5,92	17,05
Maria Albina	HCOM	12	7,83	3,59	12,88	1,04	45,81	1	14
Maria Albina	VOLRTOT	12	0,1	0,09	0,01	0,03	87,18	4,30E-03	0,27
Maria Albina	VOLRCOM	12	0,1	0,09	0,01	0,03	88	3,40E-03	0,27
Mi Refugio	DAP	10	19,24	4,98	24,78	1,57	25,87	9,5	25,2
Mi Refugio	HTOTAL	10	20,66	3,49	12,19	1,1	16,9	14,78	26,59
Mi Refugio	HCOM	10	14,7	3,71	13,79	1,17	25,26	8	18
Mi Refugio	VOLRTOT	10	0,27	0,13	0,02	0,04	49,35	0,04	0,49
Mi Refugio	VOLRCOM	10	0,26	0,13	0,02	0,04	49,74	0,04	0,49
P de los T	DAP	19	15,65	3,58	12,81	0,82	22,87	8,1	21
P de los T	HTOTAL	19	15,1	2,12	4,5	0,49	14,04	8,68	18,3
P de los T	HCOM	19	11,05	2,41	5,83	0,55	21,85	4	15
P de los T	VOLRTOT	19	0,13	0,06	3,20E-03	0,01	45,36	0,02	0,24
P de los T	VOLRCOM	19	0,12	0,06	3,30E-03	0,01	46,08	0,02	0,23

Palmares	DAP	18	16,2	6,08	36,97	1,43	37,53	5,3	28,6
Palmares	HTOTAL	18	15,25	3,19	10,18	0,75	20,91	7,92	19,05
Palmares	HCOM	18	10,94	4,17	17,35	0,98	38,06	1	15
Palmares	VOLRTOT	18	0,17	0,13	0,02	0,03	77,03	0,01	0,54
Palmares	VOLRCOM	18	0,17	0,13	0,02	0,03	77,78	4,30E-03	0,54
Pucanix	DAP	15	17,04	7,17	51,38	1,85	42,06	7,3	30
Pucanix	HTOTAL	15	17,88	4,81	23,18	1,24	26,93	9,07	24,48
Pucanix	HCOM	15	13,73	5,31	28,21	1,37	38,67	5	21
Pucanix	VOLRTOT	15	0,25	0,22	0,05	0,06	88,42	0,02	0,73
Pucanix	VOLRCOM	15	0,26	0,23	0,05	0,06	91,13	0,02	0,78
Sauce Solo	DAP	17	17,43	5,98	35,74	1,45	34,3	5,9	28,2
Sauce Solo	HTOTAL	17	17,77	3,81	14,55	0,93	21,47	9,57	22,76
Sauce Solo	HCOM	17	13,35	4,58	20,99	1,11	34,31	2	18
Sauce Solo	VOLRTOT	17	0,23	0,17	0,03	0,04	73,36	0,01	0,67
Sauce Solo	VOLRCOM	17	0,22	0,17	0,03	0,04	78,71	0,01	0,67
Soca	DAP	21	16,59	6,45	41,57	1,41	38,86	3,8	26
Soca	HTOTAL	21	16,52	3,94	15,51	0,86	23,85	5,86	20,83
Soca	HCOM	21	12,14	4,39	19,23	0,96	36,11	1	17
Soca	VOLRTOT	21	0,2	0,13	0,02	0,03	67,7	0,01	0,46
Soca	VOLRCOM	21	0,2	0,13	0,02	0,03	68,34	3,70E-03	0,46

Donde:

DAP: diámetro a la altura del pecho en cm

HTOTAL: Altura total en metros

HCOM: Altura comercial en metros

VOLRTOT: Volumen real total en metros cúbicos con corteza

VOLRCOM: Volumen real comercial en metros cúbicos con corteza

Establecimiento: Establecimiento donde se tomó la muestra

n : tamaño de muestra

Media: promedio según parámetro

D.E.: Desvío estándar

Var (n-1): Varianza

E.E.: Error estándar

C.V.: Coeficiente de variación

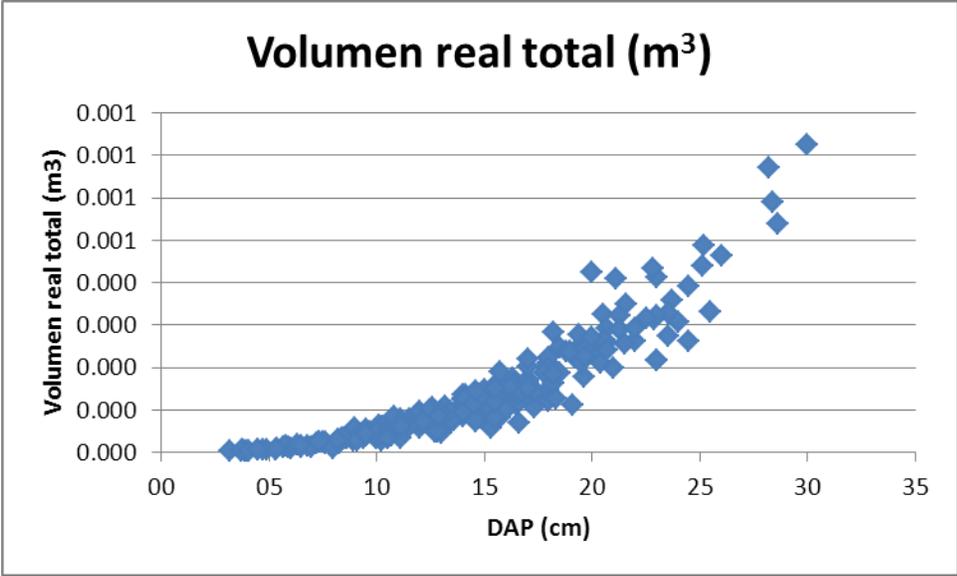
Mín: valor mínimo

Máx: valor máximo

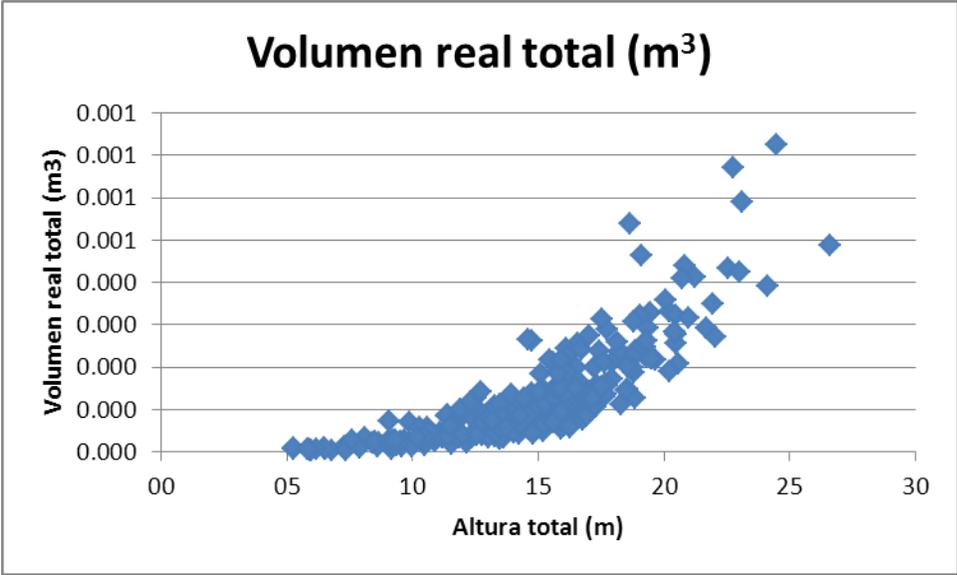
El resultado de la matriz de correlación de las variables obtenidas en terreno se presenta en la Cuadro 3, donde se observa que para ambos tipos de volúmenes las variables predictoras presentan una relación lineal significativa, siendo el DAP el que presenta la mayor significación estadística. Por la alta correlación entre las alturas y el DAP se ajustarán funciones matemáticas simples, ya que las múltiples originarían problemas de multicolinealidad. La variable predictora de la función matemática simple puede ser una de las variables medidas en terreno o bien combinaciones de ellas.

A los efectos de ver el comportamiento de las variables de interés, se presentan los gráficos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que presentan la dispersión del volumen real total y comercial en función de variables fáciles de determinar en los árboles como son el diámetro a la altura del pecho, altura total y altura comercial. En todos los casos los diagramas de dispersión muestran una tendencia exponencial.

**Ilustración 1 Diagrama de dispersión del volumen real total (m<sup>3</sup>) en función del DAP (cm)**

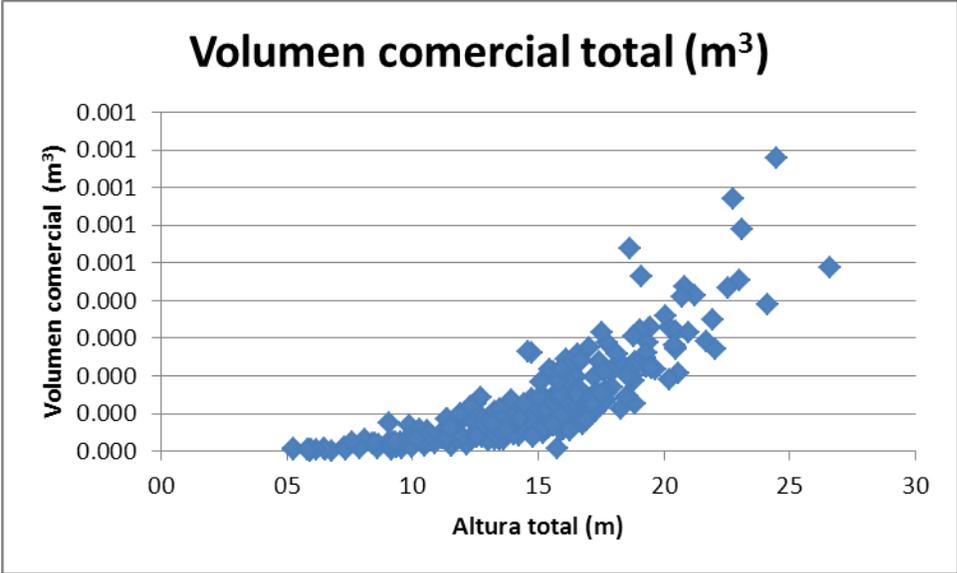


**Ilustración 2 Diagrama de dispersión del volumen real total (m<sup>3</sup>) en función de la altura total (m)**

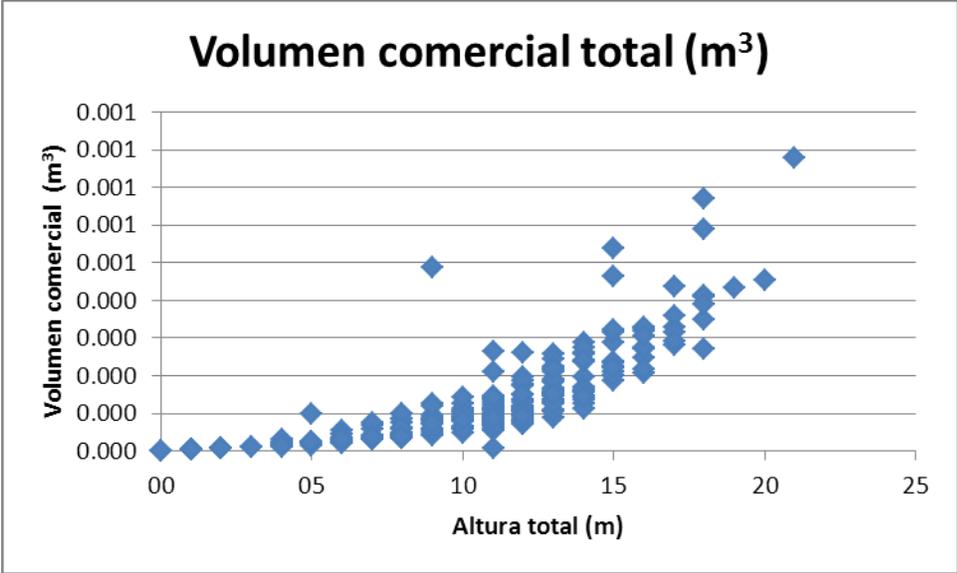




**Ilustración 5 Diagrama de dispersión del volumen comercial (m<sup>3</sup>) en función de la altura total (m)**



**Ilustración 6 Diagrama de dispersión del volumen comercial (m<sup>3</sup>) en función de la altura comercial (m)**



**Cuadro 6 Matriz de correlación entre variables**

	$v_t$	$v_c$	DAP	$h_t$	$h_c$
$v_t$	1				
$v_c$	1	1			
DAP	0,9	0,9	1		
$h_t$	0,8	0,8	0,81	1	
$h_c$	0,79	0,79	0,85	0,95	1

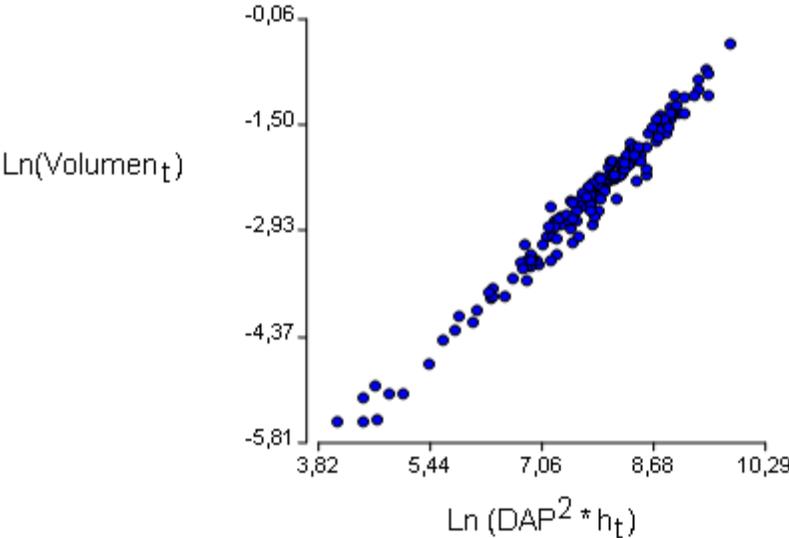
Donde  $v_t$  es el volumen total de los árboles en  $m^3$ ,  $v_c$  es el volumen comercial de los árboles en  $m^3$ , DAP es el diámetro con corteza a la altura del pecho en cm,  $h_t$  es la altura total de los árboles en m y  $h_c$  es la altura comercial de los árboles en m.

Para el volumen total y comercial se determinó que la función de variable combinada [  $Volumen = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 * h$  ], presentaba la mayor significación estadística. Sin embargo, esta función no logró alcanzar la exactitud requerida, de modo que las variables fueron transformadas, aplicando logaritmo y comprobando que con esto cumplía con la exactitud requerida.

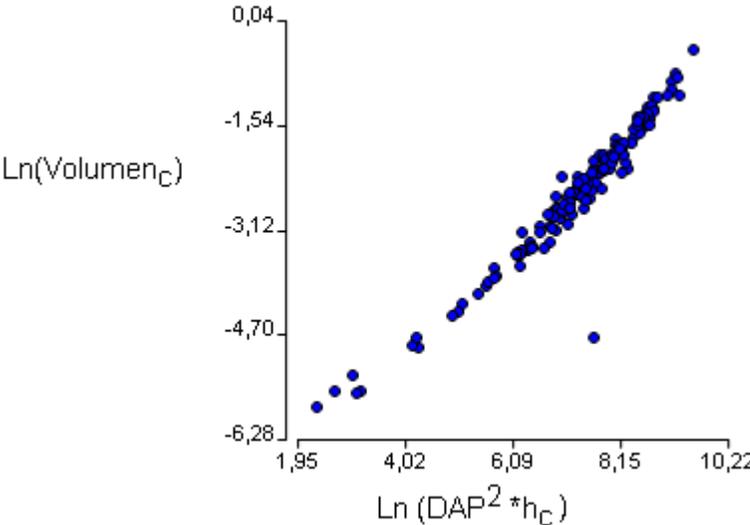
La función propuesta para el volumen total corresponde a  $\mathbf{Ln(v_t) = -9,75 + 0,93 * Ln (DAP^2 * h_t)}$  que presenta un coeficiente de determinación ajustado de 0,98 y un error cuadrático medio ponderado de 0,02. La exactitud lograda correspondió a un 80%. En la Figura 1 se observa la dispersión de los datos de las variables transformadas.

La función propuesta para el volumen comercial corresponde a  $\mathbf{Ln(v_c) = -8,22 + 0,77 * Ln (DAP^2 * h_c)}$  que presenta un coeficiente de determinación ajustado de 0,95 y un error cuadrático medio ponderado de 0,06. La exactitud lograda correspondió a un 80%. En la Figura 2 se observa la dispersión de los datos de las variables transformadas.

**Ilustración 7**    **Dispersión de las variables transformadas**



**Ilustración 8**    **Dispersión de las variables transformadas**



La Cuadro 3, presenta los resultados de aplicar el modelo logrado para obtener el volumen total y comercial en metros cúbicos en función del diámetro a la altura del pecho en centímetros, la

altura total en metros o la altura comercial en metros según sea lo que se desea calcular. Las alturas que presenta el cuadro se calcularon mediante curvas hipsométricas. Donde Altura total (m) =  $7,5767\ln(\text{DAP}) - 4,7503$  y Altura comercial (m) =  $y = 8,7481\ln(x) - 12,107$ .

**Cuadro 7 volumen general para volumen total y comercial**

Dap (cm)	Ht (m)	Hc (m)	Volumen total (m <sup>3</sup> )	Volumen comercial (m <sup>3</sup> )
10	12,7	8,0	0,044878	0,046450
11	13,4	8,9	0,056411	0,058043
12	14,1	9,6	0,069346	0,070709
13	14,7	10,3	0,083698	0,084426
14	15,2	11,0	0,099480	0,099173
15	15,8	11,6	0,116704	0,114929
16	16,3	12,1	0,135380	0,131677
17	16,7	12,7	0,155518	0,149398
18	17,1	13,2	0,177126	0,168078
19	17,6	13,7	0,200213	0,187699
20	17,9	14,1	0,224785	0,208249
21	18,3	14,5	0,250850	0,229714
22	18,7	14,9	0,278414	0,252081
23	19,0	15,3	0,307482	0,275338
24	19,3	15,7	0,338060	0,299474
25	19,6	16,1	0,370153	0,324478
26	19,9	16,4	0,403765	0,350340
27	20,2	16,7	0,438902	0,377049
28	20,5	17,0	0,475566	0,404597
29	20,8	17,4	0,513763	0,432974
30	21,0	17,6	0,553496	0,462171

En la Cuadro 8 se presentan las funciones matemáticas seleccionadas para las tablas locales de volumen con corteza según el establecimiento.

**Cuadro 8 funciones de regresión seleccionadas según tipo de volumen y establecimiento.**

Establecimiento	Función matemática	R <sup>2</sup> ajustado	ECMP	Exactitud
1 San José (Palmares de San Gregorio)	$V_t = 3,20 E - 04 + 3,50 E - 05 * (DAP^2 * h_t)$	0,99	2,70 E - 04	81,83
	$V_c = -1,40 E - 03 + 3,50 E - 05 *(DAP^2 * h_t)$	0,99	2,70 E - 04	89,09
2 Montevideo (Mailhos)	$V_t = 0,01 + 5,40 E - 05 * (DAP * h_c^2)$	0,98	1,40 E - 04	85,99
	$V_c = 0,01 + 5,50 E - 05 *(DAP * h_c^2)$	0,98	1,50 E - 04	89,06
3 Canelones 1 (Soca s.a)	$V_t = 0,01 + 3,20 E - 05 * (DAP^2 * h_t)$	0,98	4,50 E - 04	93,21
	$V_c = 0,01 + 3,20 E - 05 * (DAP^2 * h_t)$	0,98	4,60 E - 04	92,80
4 Canelones 2 (Puig)	$V_t = 2,50 E - 03 + 3,30 E - 05 * (H * DAP^2)$	0,98	0,01	91,59
	$V_c = 0,01 + 4,00 E - 05 * (HCOM * DAP^2)$	0,94	1,70 E - 04	86,27
5 Canelones 3 (Sauce Solo)	$V_t = 7,90 E - 04 + 3,40 E - 05 * (DAP^2 * h_t)$	0,94	2,60 E - 03	90,86
	$V_c = -0,05 + 8,00 E - 04 * DAP^2$	0,9	4,70 E - 03	80,00
6 Lavalleja 1 (Canteras Ancap)	$V_t = 7,60 E - 05 * \exp (0,89 * LN\_H * DAP^2)$		1,20 E - 04	80,00
	$Ln (V_c) = -7,64 + 0,69 * Ln (* DAP^2 * h_c)$	0,97	0,04	84,07
7 Lavalleja 2 (Mi Refugio s.a)	$V_t = -0,06 + 8,00 E - 04 * (DAP * h_t)$	0,98	5,70 E - 04	80,66
	$V_c = -0,07 + 8,10 E - 04 * (DAP * h_t)$	0,98	5,90 E - 04	92,93
8 Lavalleja 3 (Pucanix)	$V_t = 1,20 E - 03 + 5,60 E - 05 * (DAP * h_c^2)$	0,98	1,30 E - 03	80,00
	$V_c = -0,01 + 5,80 E - 05 * (DAP * h_c^2)$	0,98	1,20 E - 03	80,79
9 Lavalleja 4 (Paso de los troncos)	$V_t = -0,01 + 3,40 E - 05 * (DAP * h_t^2)$	0,9	3,80 E - 04	80,35
	$Ln (V_c) = -0,01 + 3,50 E - 05 * Ln(DAP * h_c^2)$	0,95	0,03	80,35
10 Lavalleja 5 (Barriga Negra)	$Ln (V_t) = -10,86 + 1,59 * Ln (DAP * h_t)$	0,98	0,01	91,59
	$V_c = 0,01 + 4,70 E - 05 * (DAP * h_c^2)$	0,96	1,80 E - 04	88,44

11 Lavalleja 6 (María Albina)	$V_t = 0,01 + 2,90 E - 05 * (DAP^2 * h_t)$	0,97	2,60E - 04	94,21
	$V_c = -0,01 + 6,11 * AB$	0,97	3,90E - 04	82,11
12 Lavalleja 7 (Eufores) (Minas)	$V_t = -0,01 + 3,40 E - 05 * (DAP * h_t^2)$	0,95	1,20E - 04	89,08
	$V_c = 0,01 + 5,40 E - 05 * (DAP * h_c^2)$	0,95	1,20E - 04	89,35
13 Rocha (India Muerta)	$V_t = 0,01 + 2,70 E - 05 * DAP^3$	0,98	2,40E - 04	82,17
	$V_c = - 0,02 + 6,00 E - 04 * DAP^2$	0,98	2,40E - 04	84,27

## Discusión

Se logró obtener modelos de fácil aplicación para las tablas de volumen general total y comercial de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* en la zona sur del Uruguay. También se obtuvieron modelos aplicables a nivel de zonas restrictas como lo son las tablas de volumen local para volumen total y comercial en 13 diferentes zonas.

Los modelos ajustados para la elaboración de tablas de volumen general (sur del Río Negro) para volumen comercial y local alcanzaron un valor de predicción superior al 70 % en la validación, por lo que pueden ser utilizados en el sur del país para predecir los rendimientos con una predicción aceptable a la escala de trabajo.

En los modelos locales ajustados para 12 sitios obtuvieron un valor superior a 70% en la validación, por lo que pueden ser utilizados para estimar los rendimientos de las plantaciones en dichos sitios. Solo en un sitio (Pucanix), no se alcanzó la exactitud considerada límite, por lo que no se recomienda el uso de dichos modelos para ese sitio.

De esta manera se logró el objetivo del trabajo, donde los modelos obtenidos permitirán obtener resultados precisos de las plantaciones de forma de realizar predicciones para cosechas o manejos sustentables de los bosques que utilizan la especie estudiada.

Como futuras líneas de investigación sería importante seguir con la construcción de tablas de volumen para otras especies de rápido crecimiento utilizadas en el país, como ser *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunii*, *Eucalyptus globulus ssp. maidenii* y materializar dichos modelos matemáticos en software de simulación que permitiría obtener predicciones de crecimiento y regular cortas y suministros de materia prima.

## **Bibliografía**

- Alder D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Predicción del rendimiento, Vol 22/2. FAO: Montes. 198 pp.
- Balmelli G.; Resquin F.; Altier N.; Marrón V. 2006. Evaluación sanitaria, productiva y de propiedades de madera de diferentes orígenes de *Eucalyptus globulus* a los 11 años. Serie actividades de difusión. Uruguay. INIA. Nº. 462. 35p.
- Bruce, D., Schumacher. F. 1965. Medición Forestal. México, Herrero, 474p.
- Caillez F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol 22/1. FAO: Montes. 92 pp.
- Freese, F. 1960. Testing Accuracy. New Orleans. Biometrician at the Southern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, La. Volume 6, number 2.
- Fucaraccio, F.; Staffieri G.; Wabo, E. 1992. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina. Tesis Ingeniero Agrónomo. La Plata, Argentina, Universidad Nacional de la Plata – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 27p.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2004. Boletín Estadístico. Montevideo. Dirección General Forestal. Año 4 Número 3. 44p.
- Prodan, M., P. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. IICA, BMZ y GTZ. 586 p.
- Steel, R. G. D.; Torrie, J. H.. 1985. Bioestadística, principios y procedimientos. Bogotá : McGraw-Hill, 622 p.
- Steel, R. G. D.; Torrie, J. H.. 1985. Bioestadística, principios y procedimientos. Bogotá : McGraw-Hill, 622 p.