

Ecuaciones de volumen y calidad de forma para *Tabebuia rosea* (Bertol.) en plantaciones en líneas. Barinas, Venezuela

*Volume equations and quality form for **Tabebuia rosea** (Bertol.) in line plantations. Barinas, Venezuela*

ANA QUEVEDO,
MAURICIO JEREZ,
ANA YAJAIRA MORET
y OSCAR NOGUERA

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Grupo de Investigación Genética y Silvicultura, Instituto de Investigación
para el Desarrollo Forestal, E-mail: anaq@ula.ve

Recibido: 25-03-10 / Aceptado: 28-10-10

Resumen

Se desarrollaron ecuaciones de volumen aprovechable con corteza (m^3) para árboles en pie de apamate (*Tabebuia rosea* Bertol.) a partir de las variables, diámetro a la altura de pecho (d), altura total (h_t), y altura de fuste (h_f). Se ajustaron modelos de regresión lineales y no lineales con efectos fijos y mixtos. El conjunto de datos para el ajuste de modelos fue una muestra de árboles en pie. Los modelos fueron validados utilizando una muestra independiente de árboles apeados. Los modelos de efectos mixtos presentaron menores errores estándar de los coeficientes que los de efectos fijos. También, presentaron mejores valores de los criterios de bondad de ajuste (criterios de máxima verosimilitud) y fueron superiores en términos de sesgo e índice de ajuste. Para los datos de validación los modelos mixtos presentaron menor sesgo que los modelos de efectos fijos. La variable combinada $d^2 \cdot h_f$ fue el mejor predictor del volumen aprovechable. Se evaluó la calidad de forma de los fustes de los árboles en pie de plantaciones sometidas a diferentes intensidades y edad de aclareos. Para ello, el fuste de los árboles se subdividió "visualmente" en rolas de tres metros de longitud y se clasificaron de acuerdo a su forma y posición (altura). El tratamiento con el aclareo más temprano y más intenso presentó la mayor cantidad de rolas de calidad óptima en la primera posición del fuste (110 rolas/ha y 37 m^3 /ha). Para este régimen, más del 60% de las rolas fueron de calidad óptima hasta seis metros de altura.

Palabras clave: modelos mixtos, heterogeneidad de varianzas, apamate, control de calidad en plantaciones forestales.

Abstract

In this study, merchantable overbark (m^3) volume equations for standing trees of apamate (*Tabebuia rosea* Bertol.) were developed using as independent variables diameter at breast height (d), total height (h_t), and bole height (h_f). Linear and non-linear regression models with fixed and mixed effects were fitted. The dataset for fitting came from a sample of standing trees. The models were validated using an independent sample of felled trees. Both, linear and non linear mixed effects models showed lower standard errors for the estimated coefficients than those of fixed effects. Also, they had better goodness of fit (maximum likelihood criteria) and were superior in terms of bias and fit index. For the felled trees dataset the performance of the mixed models showed a lower bias for the mean value of the function than the fixed effects models. The combined variable $d^2 \cdot h_f$ was the best predictor of merchantable volume. The form quality of boles for standing trees was evaluated in plantations subjected to thinning differing in age and intensity. For it, the boles were subdivided "visually" in three meters sections and classified according to their form and position in the bole. The treatment with the earliest and most intensive thinning showed the greatest amount of sections (per ha) of optimum quality in the first position of the bole (110 pieces/ha and a raw volume of 37 m^3 /ha). For this regime, more than 60 % of the bole sections were of optimum quality up to six meters in height.

Key words: mixed models, variance heterogeneity, apamate, quality control in plantations.

1. Introducción

Durante los últimos cuarenta años la Universidad de Los Andes (ULA) conjuntamente con otros organismos del Estado venezolano han venido realizando investigaciones con fines de determinar los métodos, técnicas y procedimientos para el ma-

nejo silvicultural de diferentes especies forestales. Una de las especies más prometedoras es el apamate [*Tabebuia rosea* (Bertol) DC.], por su rápido crecimiento, alto valor económico y adaptabilidad a varias condiciones ambientales, particularmente algunas zonas inundables de los Llanos Occidentales, donde otras especies valiosas no pueden desa-

rollarse adecuadamente. Entre estas investigaciones, se destacan las llevadas a cabo por la ULA en la Reserva Forestal Caparo, ubicada en el estado Barinas, donde se establecieron en el año 1976 ensayos piloto de plantaciones en líneas con diferentes especies bajo el método Caparo, opción silvícola de conversión del bosque mediante regeneración por plantación. El método Caparo es una modalidad de plantación en líneas apropiada para bosques productores aprovechados, con ausencia de regeneración suficiente de especies de interés comercial. Esta modalidad, incluye el socialado (eliminación manual del sotobosque), la quema controlada, la apertura de picas de plantación y la implantación (Jerez y Vincent, 1991, 1995).

Las plantaciones bajo el método Caparo se establecieron en el tipo de bosque selva subsiempre verde de subbanco y bosque subsiempre verde de bajo, tanto en bosques altos como en bosques degradados o bosques secundarios. Las especies utilizadas son de crecimiento inicial rápido y de tipo "cicatrizadoras" u "oportunistas" y de buena forma (Dawkins, 1958; citado por Vincent, 2000). Las especies más adecuadas según los ensayos de especies realizados son: apamate (*T. rosea*), pardillo negro (*Cordia thaisiana*), saqui saqui (*Pachira quinata*) y cedro (*Cedrela odorata*). El distanciamiento inicial de plantación es variable; dentro de las hileras es generalmente de 2 a 2,5 m, mientras que entre hileras el distanciamiento debe ser mayor que el diámetro promedio alcanzado por las copas de los árboles al final del turno. Este margen de espaciamiento tiene como finalidad evitar cualquier probabilidad de competencia entre líneas (fajas) antes de la madurez y ahorrar costos de establecimiento y mantenimiento (Lamb, 1958; citado por Vincent, 2000). Generalmente, se programa la realización de un sólo aclareo, con la finalidad principal de eliminar la competencia dentro de las hileras y dejar en pie sólo la masa que constituirá la cosecha final. Desde el momento del establecimiento de las plantaciones han sido evaluadas periódicamente y resultados han sido presentados por Vincent y Bustamante (1973), Jerez y Vincent (1991, 1995), Gimón (1995) y Puccini (2003), la variable de análisis más importante utilizada ha sido la abundancia efectiva, que incluye no sólo la cantidad de individuos por especificación diamétrica y calidad, sino la distribución espacial, que es importante en la esti-

mación de la masa forestal aprovechable (Vincent, 2000). De las especies ensayadas la *Tabebuia rosea* ha presentado los resultados más prometedores, por ejemplo, Jerez y Vincent (1995) evaluaron las plantaciones en líneas método Caparo de apamate, pardillo negro y saqui-saqui a los 20 años de edad en Caparo, a través de un muestreo aleatorio simple con restricciones, encontrando que el apamate presentó elevados valores de abundancia efectiva para las especificaciones diamétricas avanzadas (30, 35 y 40 cm), lo que apunta al alto potencial productivo de esta especie para la producción de madera para aserrío.

Peña (1996), realizó ensayos con la especie apamate bajo el método Caparo mediante técnicas multivariantes, las variables estudiadas fueron sobrevivencia, altura, diámetro y área basal, encontrando que el crecimiento (diámetro y altura) de la especie está influenciada por un conjunto de factores edáficos, biológicos y por las técnicas de implantación utilizadas. Por su parte Guevara (1997), estudió la factibilidad de las plantaciones de apamate bajo el método Caparo como opción silvicultural para los Llanos Occidentales desde el punto de vista del rendimiento biológico y financiero, los resultados sugieren que el turno óptimo financiero para esta especie está alrededor de los 28 años de edad. Puccini (2003), reevaluó estas plantaciones a los 28 años de edad comprobando la buena adaptabilidad de esta especie a suelos relativamente pesados y con drenaje regular a malo.

Hasta ahora, no se dispone de ecuaciones de volumen que permitan estimar el volumen de árboles en pie para esta especie cuando crece en condiciones de plantación en líneas. El uso de las ecuaciones de volumen es una alternativa de amplio uso en el manejo forestal y permite la estimación del mismo mediante ecuaciones generadas a partir de medidas detalladas, tomadas sobre una pequeña muestra representativa de la población (Moret y Ruiz, 1998). Existen metodologías relativamente bien desarrolladas para llevar a cabo este tipo de trabajo. Por ejemplo, Moret *et al.* (1998) desarrollaron ecuaciones de volumen para teca (*Tectona grandis* L.); mientras que Albarrán y Zerpa (1992) para pino caribe (*Pinus caribaea*) en el Oriente del país; Rivas (2004) para eucaliptos (*E. urophylla* y *E. x urograndis*); y Rosales y Maratón (2000) para melina (*Gmelina arborea*). No se encontraron refe-

rencias de ecuaciones de volumen para *T. rosea* en Venezuela o en alguna otra parte del mundo en la bibliografía consultada.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1. Desarrollar y validar ecuaciones de volumen aprovechable para plantaciones maduras de apamate en la Reserva Forestal Caparo; 2. Estimar la calidad morfológica de los árboles de estas plantaciones con fines de aprovechamiento.

2.1 Materiales y métodos

2.1.1 Descripción del área de estudio

La Reserva Forestal Caparo se ubica al suroeste del estado Barinas, se divide en unidades de manejo forestal, correspondiendo a la Universidad de Los Andes (ULA), bajo la figura de Comodato con el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (Mppa). La Unidad Experimental cuenta con una superficie de 7.800 ha, un 4% de la superficie total de la Reserva (176.000 ha) con una altitud promedio de 140 msnm (Figura 1a,b).

La zona de vida corresponde al bosque húmedo tropical, cerca de la transición hacia bosque seco tropical según la clasificación de Holdridge (Ewel *et al.*, 1976). La precipitación promedio anual es de unos 1900 mm, con una estación seca en los meses de enero a abril y una temperatura media anual por el orden de 25°C. El relieve es plano y los suelos son de origen aluvial presentándose micro relieves que conforman unidades fisiográficas (bancos, subbancos y bajíos) con propiedades hidrológicas y edáficas características que determinan la vegetación que so-

bre ellas se desarrolla (Franco y Föelster, 1982). En los bancos, los suelos suelen ser franco arenosos, pasando a franco-limosos y franco-arcillosos en los sub-bancos, mientras que los bajíos con drenaje pobre e inundable en la época lluviosa, son ricos en arcillas. La intensidad de la inundación depende del microrelieve y la textura del suelo (Franco, 1979). En general dominan suelos de los órdenes Entisol, Inceptisol y Oxisol (Castillo, 1966; Díaz, 1988).

El área de estudio corresponde a un ensayo “piloto” de plantaciones en línea de apamate (método Caparo) establecidas en una superficie de 15 ha dividida en bloques de 5 ha (Figura 1b). La edad de la plantación era de 33 años para el momento de realizado el estudio. La figura 2 presenta información sobre la abundancia “efectiva” por especificación diamétrica a los 30 años de edad. La altura total promedio es de $26 \pm 3,6$ m y la altura de los árboles dominantes es de $28 \pm 2,2$ m para los árboles con $dap \geq 30$ cm.

2.1.2 Desarrollo de ecuaciones de volumen

Con base en la información de un censo realizado en 2007 (no publicado) se dividió la población en categorías diamétricas de 5 cm de amplitud. En cada categoría se seleccionaron al azar árboles en proporción al total existente en cada categoría diamétrica. De ésta muestra, se seleccionaron 46 árboles para el ajuste de las ecuaciones de volumen. Estos árboles fueron medidos en pie con un hipsómetro Laser (Laser ACE hypsometer, MDL, UK), la precisión del hipsómetro láser para la medición de alturas es de ± 10 cm. Las mediciones se hicieron

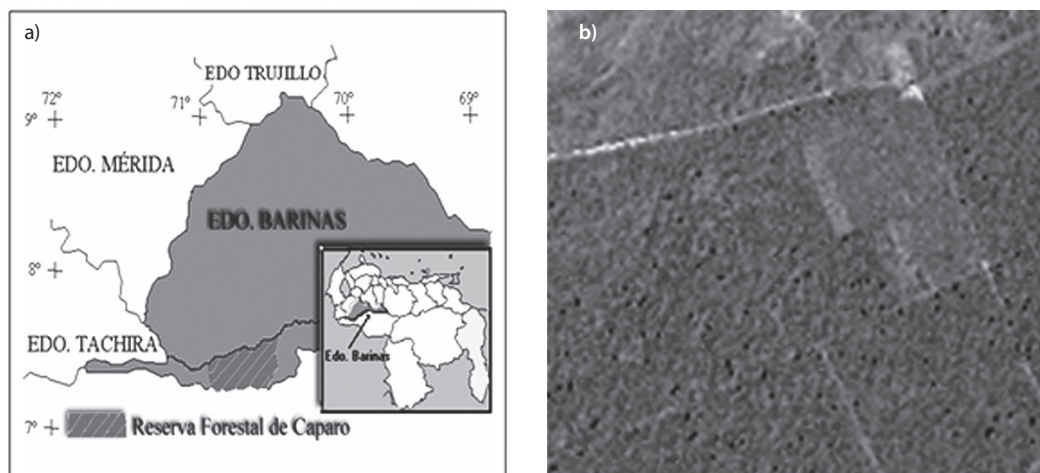


Figura 1. a) Ubicación de la Estación experimental Caparo, Barinas, Venezuela; b) Imagen SPOT de las plantaciones.

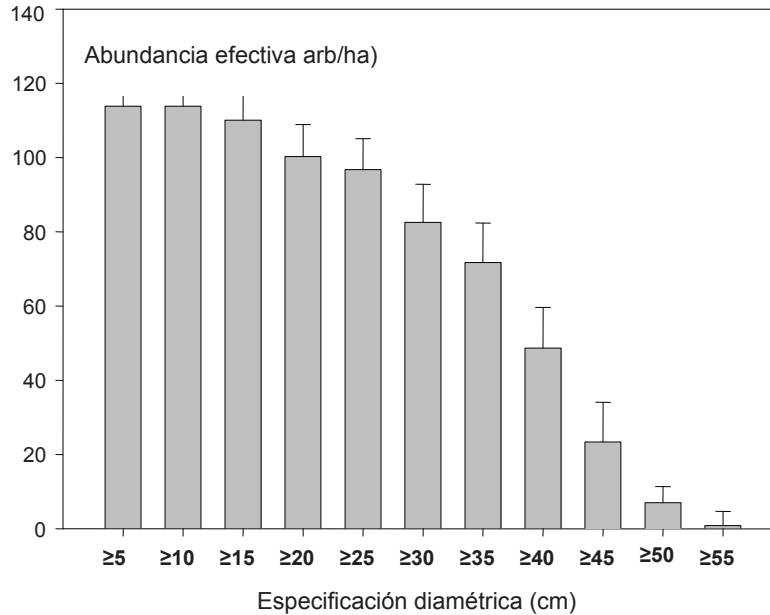


Figura 2. Media y estimación mínima confiable-EMC ($p = 0,95$) de la abundancia efectiva por especificación diamétrica a los 30 años de edad (Barras: EMC; líneas capitadas: promedio muestral).

en pie a fin de no apelar los árboles, debido a sus grandes dimensiones y a que forman parte de un área designada como rodal semillero. Se hicieron mediciones detalladas de altura total (ht) y altura de fuste (hf) (altura hasta la primera bifurcación o rama gruesa que da origen a la copa); circunferencia a la altura de pecho (cap).

Asimismo, con el hipsómetro se hicieron mediciones del diámetro del fuste a intervalos de 3 m. Para la validación se seleccionó una muestra de 22 árboles adicionales, los cuales fueron medidos en pie y posteriormente tumbados y medidos de manera directa, marcando segmentos cada dos metros de longitud. En cada caso, el volumen de cada segmento fue determinado mediante la ecuación 1 de Smalian (Cailliez, 1980; Diéguez *et al.*, 2003):

$$V_{cc} = \frac{\pi}{8} * l(d_1^2 + d_2^2) \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

V_{cc} = volumen con corteza (m^3)

d_1, d_2 = el diámetro en el extremo mayor y menor en m, respectivamente

l = longitud de la rola (m)

El volumen rollizo con corteza, se obtuvo por la suma de los volúmenes rollizos con corteza de cada segmento del fuste. Es importante resaltar

que esta muestra está conformada por árboles con dimensiones promedio menores a la de los árboles medidos en pie debido a las limitaciones indicadas anteriormente.

2.2 Procesamiento de los datos para la determinación del volumen

El ajuste de los modelos se hizo mediante regresión, usando el volumen con corteza (m^3) como variable respuesta y como variables independientes diámetro a la altura de pecho, la altura total, y la altura de fuste, sólo con la muestra de árboles medidos en pie. Se emplearon modelos lineales y no lineales de efectos fijos y de efectos mixtos (Cuadros 1 y 2). Los datos fueron procesados mediante los procedimientos MIXED y NLMIXED (SAS v. 9.0, SAS Institute Inc., 2004). Dado que los datos presentan una fuerte heterogeneidad en las varianzas (mayor dispersión en el volumen a mayor valor de altura y diámetro) se emplearon modelos mixtos para corregir dicha heterogeneidad. Los árboles se agruparon en categorías diamétricas de 5 cm de amplitud asumiendo que las varianzas de cada categoría son diferentes. Esto permitió inducir una autocorrelación entre los individuos de una misma categoría diamétrica.

Cuadro 1. Modelos Lineales empleados. V_t = Volumen total sobre corteza (m³), d = diámetro a la altura de pecho (cm), h_t = altura total (m), h_f =altura de fuste (m).

Modelo	Forma funcional	Σ^*
1.1	$V_t = \alpha + \beta(d^2 \cdot h_t) + \varepsilon$	$\sigma^2 I$
1.2	"	Potencia de x
1.3	"	Potencia de la media
1.4	"	CSH**
1.5	$V_t = \alpha + \beta(d^2 \cdot h_t) + \varepsilon$	$\sigma^2 I$
1.6	"	Potencia de x
1.7	"	Potencia de la media
1.8	"	CSH**

*Estructura de la matriz de varianzas-covarianzas; **Simetría compuesta heterogénea

Cuadro 2. Modelos No lineales empleados.

Modelo	Forma funcional'	Efectos
2.1	$V_t = \beta_0 \cdot (d h_t/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Fijos
2.2	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d h_t/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Mixtos
2.3	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d h_t/100)^{(\beta_1+u_2)} + \varepsilon$	Mixtos
2.4	$V_t = \beta_0 \cdot (d h_f/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Fijos
2.5	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d h_f/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Mixtos
2.6	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d h_f/100)^{(\beta_1+u_2)} + \varepsilon$	Mixtos
2.7	$V_t = \beta_0 \cdot (d^2 h_t/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Fijos
2.8	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d^2 h_t/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Mixtos
2.9	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d^2 h_t/100)^{(\beta_1+u_2)} + \varepsilon$	Mixtos
2.10	$V_t = \beta_0 \cdot (d^2 h_f/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Fijos
2.11	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d^2 h_f/100)^{\beta_1} + \varepsilon$	Mixtos
2.12	$V_t = (\beta_0 + \mu_1) \cdot (d^2 h_f/100)^{(\beta_1+u_2)} + \varepsilon$	Mixtos

Donde: V_t = Volumen total sobre corteza (m³); d = diámetro a la altura de pecho (cm); h_t = altura total (m); h_f = altura de fuste (m); μ_1 y μ_2 = efectos aleatorios.

El método clásico para analizar datos con problemas de heterogeneidad de varianza ha sido el de realizar transformaciones en las variables. Con los procedimientos MIXED Y NLMIXED es posible modelar la matriz de varianzas y covarianzas evitándose los problemas derivados de la transforma-

ción del modelo. Se emplearon tres estructuras de la matriz Σ para ajustar los modelos:

1. La función de dispersión conocida como "potencia de X" (Carroll y Ruppert, 1988; citados por q *et al.*, 2006), la cual especifica la varianza de los errores observados, según la ecuación 2:

$$Var(\varepsilon_i) = \sigma^2 (exp\{x_i, \gamma\}) \tag{Ec. 2}$$

Donde:

σ^2, γ = "parámetros de efecto de dispersión" a estimar
 $y x_i$ = la variable independiente.

2. La función "potencia de la media" la cual especifica la varianza de los residuos con la ecuación 3:

$$Var(\varepsilon_i) = \sigma^2 |\alpha + x_i \beta|^\theta \tag{Ec. 3}$$

Donde:

σ^2, θ = parámetros a estimar
 α = intercepto del modelo
 β = pendiente

3. El modelo con matriz Σ conocido como Simetría Compuesta Heterogénea (HCS) donde para cada categoría diamétrica el valor de σ^2 es diferente y los elementos de las covarianzas tienen correlación constante. Los dos primeros modelos consideran a la varianza de los residuos como una función de la variable independiente, a diferencia del caso clásico donde la varianza de los errores es constante (Cuadro 3).

Para evaluar el ajuste de los modelos se utilizaron pruebas de razón de máxima verosimilitud: logaritmo de verosimilitud (-2logL), criterio de información de Akaike (CIA); Akaike corregido (CIAC); y criterio bayesiano de información de Schwartz (CBIS). Los tres últimos son más adecuados debido a que compensan las diferencias en los grados de libertad surgidas de la especificación de modelos con diferente estructura (De los Santos-Posadas *et al.*, 2006).

En estos criterios, a menor valor, mejor el ajuste. Adicionalmente, como medidas de sesgo se calculó la desviación media de los residuales (MD) (Ecuación 4):

$$MD = 1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

y_i, \hat{y}_i = valores observados y predichos respectivamente para cada parcela

n = número observaciones

y = la media de los valores absolutos (MDA) similar a MD excepto que se toma $y_i - \hat{y}_i$

Un índice de ajuste (IA) (Ecuación 5), se calculó como medida de la precisión de los modelos (Mayer y Butler, 1993). El IA es análogo al coeficiente de determinación R^2 , pero varía entre $-∞$ y 1, con 1 indicando un ajuste perfecto (Kvålseth, 1985).

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Para la validación de los modelos se utilizó los datos de volumen total obtenidos para los árboles apeados de la muestra y se calcularon las medidas

de sesgo descritas anteriormente. Los mejores modelos fueron aquellos que presentaron mejores valores en términos de significación estadística de los coeficientes, menor valor de los criterios de información, menor sesgo y mejor índice de ajuste para los datos de desarrollo y particularmente para los datos de validación.

2.3 Evaluación de la calidad de los fustes

Para evaluar la calidad de la plantación en términos de la calidad de forma de los fustes se evaluó una muestra de árboles proveniente de parcelas de rendimiento y aclareo sometidas a diferentes regímenes de aclareo y liberación: **1.** Parcelas de Muestreo Continuo (PMC) con un aclareo del 80% a los 14 años de edad. Se trata de 10 parcelas establecidas aleatoriamente sobre el área de estudio. Cada parcela tiene una superficie aproximada de 1.200 m²; **2.** Parcela de aclareo y rendimiento (PPR74_3) con un aclareo de 60% a los 11 años de edad, con una superficie de 3.300 m²; **3.** Parcela de aclareo y ren-

Cuadro 3. Coeficientes estimados para los modelos lineales y no lineales (En paréntesis errores estándar. Efectos fijos (b_0, b_1); Desviación estándar de efectos aleatorios (su_1, su_2); desviación estándar de los residuos (se). En todos los modelos $p < 0,05$ excepto los indicados con ns).

Modelos	Var*	Efectos	b_0	b_1	Se	Su_1	Su_2
Lineales							
1.1	d^2h_t	Fijos	0,09941 (0,046)	0,01594 (0,001)			
1.4	d^2h_t	Mixtos (HCS)	0,04524 (0,016)	0,01834 (0,001)			
1.5	d^2h_f	Fijos	0,07208 ^{ns} (0,039)	0,02954 (0,002)			
1.8	d^2h_f	Mixtos (HCS)	0,02693 (0,014)	0,03274 (0,001)			
No Lineales							
2.1	dh_t	Fijos	0,03223 (0,010)	1,3665 (0,126)	1,0145 (0,003)	-	
2.3	dh_t	Mixtos u_v, u_2	0,02847 (0,007)	1,4094 (0,114)	1,0039 (0,001)	2,59*E ⁻⁷ (0,000)	-0,8546 (0,018)
2.4	dh_f	Fijos	0,06457 (0,014)	1,4044 (0,1152)	1,0128 (0,003)	-	-
2.6	dh_f	Mixtos u_v, u_2	0,05369 (0,012)	1,5082 (0,124)	1,0051 (0,002)	-2,7*E ⁻⁷ (0,002)	0,0947 (0,023)
2.7	d^2h_t	Fijos	1,5805 (0,093)	0,7910 (0,070)	1,0135 (0,003)	-	-
2.8	d^2h_t	Mixtos u_1	1,6436 (0,1213)	0,8392 (0,061)	1,0031 (0,001)	0,3159 (0,057)	-
2.10	d^2h_f	Fijos	2,6809 (0,2101)	0,8464 (0,059)	1,0094 (0,002)	-	-
2.11	d^2h_f	Mixtos u_1	2,8621 (0,2818)	0,8889 (0,061)	1,0035 (0,001)	-0,4381 (0,098)	-

*Variable independiente

dimiento (PPR74_4) con un aclareo de 80% a los 11 años de edad y superficie de 3.300 m². Estas dos últimas fueron establecidas según criterios subjetivos.

Se realizó una evaluación de árboles en pie de las parcelas en estudio. Para ello, se dividió el fuste comercial de cada árbol en secciones o trozas de aproximadamente 3,0 m de longitud. Se utilizó el hipsómetro Laser para determinar estas longitudes, así como para estimar el diámetro en los extremos de cada sección. A cada una de las secciones se la clasificó de acuerdo a su calidad morfológica o externa, las cuales son aquellas características que podemos medir o valorar en el exterior del árbol, en este caso consideramos rectitud y número de trozas por árbol. Las categorías de clasificación van desde 1 hasta 4, siendo la categoría 1 asignada a trozas de calidad óptima y 4 a las de peor calidad. Asimismo, se consideró la posición de la rola dentro del árbol, ya que generalmente, la primera rola de un árbol es mejor que la segunda o la tercera; debido a que a medida que aumenta la altura se reduce el diámetro del árbol y el peso específico de la madera (Murillo, 1991).

Es posible aplicar un factor de penalización para asignar menor valor a la rola que esté más alta en el fuste. Una vez determinados estos valores se puede conocer el número de árboles que cumplen

con criterios definidos de acuerdo al interés del evaluador. Por ejemplo, se puede calcular el número de árboles con al menos tres rolas de calidad óptima, o bien, el número de árboles que tienen la primera y segunda rola de calidad óptima. Con las estimaciones de longitud y diámetros realizadas con hipsómetro laser, se hizo una estimación del volumen sobre corteza de las rolas, calculado mediante la fórmula de Smalian.

3. Resultados y discusión

En esta sección sólo se presentan los resultados para los modelos de efectos fijos y efectos mixtos que proporcionaron mejores ajustes. Los modelos de efectos mixtos tanto lineales como no lineales presentaron menores errores estándar de los coeficientes estimados que los de efectos fijos para todos los casos, los p-valores también resultaron menores en los modelos de efectos mixtos que en los modelos de efectos fijos. Igualmente, todos los modelos mixtos presentaron mejores ajustes (valores negativos más bajos) que los de los correspondientes modelos de efectos fijos (Cuadro 4).

Se debe tener en cuenta que estos criterios sólo permiten comparar un modelo con otro, pero no permiten tener una idea de que tan bueno fue el

Cuadro 4. Resultados de los criterios de bondad de ajuste. Logaritmo de verosimilitud (-2logL), criterio de información de Akaike (CIA); Akaike corregido (CIAC); criterio bayesiano de información de Schwartz (CBIS).

Modelos	Var*	Efectos	-2LogL	CIA	CIAC	CBIS
Lineales						
1.1	d^2h_t	Fijos	-13,0	-11,0	-10,9	-9,3
1.4	d^2h_t	Mixtos (HCS)	-59,2	-51,2	-50,1	-44,2
1.5	d^2h_f	Fijos	-48,5	-30,5	-24,5	-14,9
1.8	d^2h_f	Mixtos (HCS)	-74,5	-66,5	-65,4	-59,5
No Lineales						
2.1	dh_t	Fijos	-29,9	-23,9	-23,3	-18,7
2.3	dh_t	Mixtos u_1, u_2	-44,2	-34,2	-32,6	-20,0
2.4	dh_f	Fijos	-35,0	-29,0	-28,4	-23,8
2.6	dh_f	Mixtos u_1, u_2	-44,3	-34,3	-32,6	-26,1
2.7	d^2h_t	Fijos	-32,8	-26,8	-26,2	-21,6
2.8	d^2h_t	Mixtos u_1	-49,4	-41,4	-40,3	-34,9
2.10	d^2h_f	Fijos	-47,9	-41,9	-41,3	-36,7
2.11	d^2h_f	Mixtos u_1	-56,4	-48,4	-47,3	-41,8

*Variable independiente

ajuste. En el cuadro 5 se presentan los valores de MD y MAD (indicadores del sesgo del modelo) e IA (Indicador de la precisión del modelo análogo al R^2) tanto para los datos de desarrollo como los de validación. Al analizar los resultados para los datos de desarrollo se puede observar que en todos los casos los modelos que usaron la variable altura de fuste (como variable independiente), presentaron mejores ajustes que los modelos que incluyeron la altura total. Esto se debe a que en esta especie la mayor parte del volumen aprovechable se concentra en el fuste.

En general, las ramas suelen ser de pequeñas dimensiones y muy torcidas, por lo que no se consideran aprovechables, siendo la altura de fuste el mejor indicador del volumen aprovechable en esta especie. Para el conjunto de desarrollo, los mejores modelos lineales fueron los de efectos mixtos, considerando tanto altura de fuste como altura total (en este caso los de HCS (1.4 y 1.8) no fueron superiores a los modelo de efectos fijos (1.1 y 1.5) en términos de MD e IA, sin embargo, éstos tuvieron una ligera ventaja en términos de MAD. Al analizar los datos de validación de los modelos lineales, los modelos mixtos tuvieron valores de sesgo menores que los obtenidos para los modelos de efectos fijos. Los IA fueron menores para el conjunto de valida-

ción que para el de desarrollo (bajando 17 puntos en promedio para los modelos con h_t y sólo 10 puntos con respecto a los modelos con h_j).

En cuanto a los modelos no lineales, el conjunto de desarrollo, los modelos que incluyeron la variable independiente ($d^2 \cdot h$, 2.7 a 2.11) fueron superiores a los que incluyeron la variable $d \cdot h$ (2.1 a 2.6). Igualmente los modelos que incluyeron la altura de fuste fueron mejores que los que incluyeron la altura total. En todos los casos, los modelos de efectos mixtos fueron superiores a los de efectos fijos en términos de MD, MAD e IA. Esta superioridad se debe a que los modelos mixtos hacen uso de los valores de varianza estimados para los coeficientes aleatorios, lo cual les permite predecir con mayor precisión los valores de cada punto del conjunto de datos. Cuando se comparan los resultados para los datos de validación, se observa que el comportamiento de los modelos mixtos no es mejor que el de los modelos de efectos fijos en términos de índice de ajuste. Esto se debe a que en este caso solo se está utilizando los valores de la curva promedio generada para compararlos con las observaciones reales de los datos de validación. El conjunto de datos de validación, no obstante sirve como indicador de que las ecuaciones para la estimación del volumen de árboles en pie son bastante buenas

Cuadro 5. Análisis de residuos. Media de las desviaciones (MD), media de las desviaciones absolutas (MDA), e índice da ajuste (IA) para los datos de desarrollo y validación.

Modelos	Var*	Efectos	Desarrollo			Validación		
			MD	MDA	IA	MD	MDA	IA
Lineales								
1.1	$d^2 h_t$	Fijos	0,006	0,12	0,82	-0,02	0,05	0,65
1.4	$d^2 h_t$	Mixtos (HCS)	-0,020	0,11	0,80	0,00	0,05	0,65
1.5	$d^2 h_f$	Fijos	0,004	0,10	0,88	-0,02	0,05	0,78
1.8	$d^2 h_f$	Mixtos (HCS)	-0,010	0,09	0,87	0,01	0,04	0,77
No Lineales								
2.1	dh_t	Fijos	-0,003	0,12	0,83	-0,03	0,06	0,55
2.3	dh_t	Mixtos $u_v u_2$	0,000	0,04	0,98	-0,01	0,05	0,61
2.4	dh_f	Fijos	-0,004	0,11	0,85	-0,01	0,05	0,69
2.6	dh_f	Mixtos $u_v u_2$	-0,001	0,06	0,96	0,00	0,04	0,72
2.7	$d^2 h_t$	Fijos	-0,004	0,11	0,84	-0,02	0,05	0,64
2.8	$d^2 h_t$	Mixtos u_1	0,000	0,04	0,98	0,00	0,05	0,65
2.10	$d^2 h_f$	Fijos	-0,003	0,11	0,89	-0,01	0,04	0,77
2.11	$d^2 h_f$	Mixtos u_1	-0,001	0,04	0,98	0,00	0,04	0,77

*Variable independiente

cuando se comparan con resultados de volumen de árboles apeados.

Según los resultados de los cuadros anteriores se seleccionó el modelo 2.11 (modelo mixto con un coeficiente aleatorio para el intercepto) como predictor de los valores promedio de volumen por considerarse que tiene las mejores propiedades. El modelo se formula con la siguiente ecuación:

$$V_t = 2,8621 \left(\frac{d^2 * hf}{100} \right)^{0,8889} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

V_t = Volumen comercial con corteza (m³)

d = diámetro a la altura de pecho (cm)

hf = altura de fuste (m)

Los resultados de la evaluación de la calidad de las plantaciones bajo los diferentes regímenes de manejo en términos de la proporción y volumen de rolas de acuerdo a la calidad morfológica y posición en las rolas en el fuste. Se tiene un estimado de entre 400 y 600 rolas/ha con un promedio de entre 100 y 125 m³/ha para todas las calidades y posiciones (Cuadro 6). Se observa que el tratamiento con el aclareo más temprano y de mayor intensidad (PPR74-4) presentó la mayor cantidad por ha de rolas de calidad óptima en la primera posición del fuste (110 rolas y 37 m³/ha). Asimismo, para este régimen, casi el 50 % de las rolas fueron de calidad óptima dentro de las diferentes alturas del árbol (Cuadro 7). La PPR-74-3, con menor intensidad de aclareo, presenta un mayor volumen total (125 m³/ha), pero esto es debido a un elevado número de rolas de calidad 3.

Cuadro 6. Calidad morfológica de las rolas en plantaciones de apamate “Método Caparo”. Cantidad (rolas/ha) y volumen con corteza “Vcc” (m³/ha) estimados de acuerdo a la calidad y posición dentro del árbol para parcelas permanentes con diferente régimen de aclareos.

PMC*	Posición Rola	Calidad							
		1		2		3		Total	
		cantidad	Vcc	cantidad	Vcc	cantidad	Vcc	cantidad	Vcc
	1	91,7	30,5	25,8	8,6	7,6	2,5	166,6	41,6
	2	47,0	11,8	59,1	14,8	6,8	1,7	141,1	28,3
	3	8,3	1,5	76,5	13,7	16,7	3,0	119,8	18,2
	4+	0,8	0,1	50,0	6,0	44,0	5,3	106,2	11,4
	Total	147,7	43,9	211,4	43,2	75,1	12,5	434,2	99,5
PPR74_3	1	81,8	27,2	63,6	21,2	3,0	1,0	197,9	49,4
	2	90,9	22,8	39,4	9,9	18,2	4,6	185,7	37,2
	3	12,1	2,2	57,6	10,3	63,6	14,4	160,3	26,9
	4+	3,0	0,4	6,1	0,7	81,8	9,9	101,9	11,0
	Total	187,8	52,5	166,7	42,1	166,7	29,8	524,2	124,5
PPR74_4	1	109,1	36,3	3,0	1,0	0,0	0,0	149,4	37,3
	2	84,8	21,2	24,2	6,1	3,0	0,8	140,2	28,1
	3	63,6	11,4	39,4	7,1	9,1	1,6	132,3	20,1
	4+	42,5	5,1	136,4	16,5	100,0	12,1	312,6	33,7
	Total	300,1	74,1	203,1	30,6	112,1	14,5	615,3	119,2

* Regímenes de aclareo: a) PMC: Parcelas de Muestreo Continuo con un aclareo del 80% a los 14 años de edad; b) PPR74_3: Parcelas de aclareo y rendimiento con un aclareo de 60% a los 11 años de edad; c) PPR74_4: Parcelas de aclareo y rendimiento con un aclareo de 80% a los 11 años de edad. Todas las parcelas fueron sujetas a un tratamiento de “liberación”.

Cuadro 7. Porcentaje de rolas de calidad óptima según su posición en el árbol para parcelas permanentes con diferente régimen de aclareos*.

Posición Rola	PMC*	PPR74_3	PPR74_4
1	55,0	41,3	73,0
2	33,3	49,0	60,5
3	7,0	7,6	48,1
4	0,7	2,9	13,6

* Regímenes de aclareo: a) PMC1: Parcelas de Muestreo Continuo con un aclareo del 80 % a los 14 años de edad; b) PPR74_3: Parcelas de aclareo y rendimiento con un aclareo de 60 % a los 11 años de edad; c) PPR74_4: Parcelas de aclareo y rendimiento con un aclareo de 80 % a los 11 años de edad

4. Conclusiones y recomendaciones

Los modelos de efectos mixtos tanto lineales como no lineales presentaron menores errores estándar de los coeficientes estimados que los de efectos fijos para todos los casos. Los modelos que usaron la variable altura de fuste presentaron mejores ajustes que los modelos que incluyeron la altura total. Esto se debe a que en esta especie la mayor parte del volumen aprovechable se concentra en los fustes. Los modelos de efectos mixtos fueron superiores a los de efectos fijos en términos de MD, MAD e IA. Para los datos de validación el comportamiento de los modelos mixtos fue mejor que el de los modelos de efectos fijos en términos de sesgo. El conjunto de datos de validación, se utilizó como indicador de las ecuaciones para la estimación del volumen de árboles en pie resultando bastante bueno cuando se compara con los resultados de volumen de árboles apeados.

En la evaluación de la calidad de las plantaciones bajo los diferentes regímenes de manejo se encontró que el tratamiento con el aclareo más temprano y de mayor intensidad (PPR74-4) presentó la mayor cantidad por ha de rolas de calidad óptima en la primera posición del fuste, para este régimen, más del 60 % de las rolas fueron de calidad óptima en los primeros seis metros del fuste.

La evaluación de variables externas de calidad como rectitud y posición de las rolas a lo largo del fuste pueden ser herramientas muy adecuadas para llevar a cabo el control de calidad en planta-

ciones forestales. Se recomienda realizar estudios de calidad que contemple variables como sanidad del fuste, bifurcaciones, defectos, así como variables de calidad internas como peso específico de la madera, longitud de fibra, grosor de las paredes de la fibra, etc.

5. Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y de Tecnología (Cdcht) de la Universidad de Los Andes por el financiamiento aportado para la realización de presente trabajo a través del Proyecto CD-CHT FO-589-05-01-B. Al Comodato ULA-MARN, Estación Experimental Caparo y su personal y al Ingeniero José Luís Ramírez por su colaboración en los trabajos de Campo.

6. Referencias bibliográficas

- ALBARRÁN, V. y F. ZERPA. 1992. *Modelos matemáticos para generar tablas de volumen y peso verde en plantaciones de Pinus caribaea var. hondurensis del oriente Venezolano*. Boletín técnico número 5 Marzo-Abril. CVG-Productos Forestales de Oriente C.A. Venezuela. 26 p.
- CAILLIEZ, F. 1980. *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos*. Vol 1 y 2. FAO. Roma, Italia. 230 p.
- CASTILLO, J. 1966. *Estudio de suelos. Bosque Experimental ULA-Caimital. Distrito Obispos, Estado Barinas*. Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 125 p.
- DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M. M. MONTERO-MATA y M. KANNINEN. 2006. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia* 40: 521-532.
- DÍAZ, C. 1988. *Caracterización y análisis comparativo de tres ecosistemas forestales en la reserva forestal de Ticoporo, Estado Barinas*. Trabajo de grado. Maestría en Manejo de Bosques. Cefap, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 178 p.
- DIÉGUEZ, U., M. BARRIO, F. CASTEDO y M. BALBOA. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón

- para seis especies forestales comerciales de Galicia. Investigación agraria. *Sistemas y Recursos Forestales* 12 (2): 131-139.
- EWEL, J, A. MADRÍZ y J. TOSI. 1976. Zonas de vida de Venezuela. Memoria Explicativa del mapa sobre el mapa ecológico. 2da edición. Ministerio de Agricultura y Cría. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Caracas, Venezuela. 265 p.
- FRANCO, W. y H. FÖELSTER. 1982. Estudio de los suelos de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas, con énfasis en las propiedades físicas y régimen hídrico de los mismos. VIII Congreso venezolano de Ciencias del Suelo. 14 al 20 de noviembre de 1982. San Cristóbal, Táchira, Venezuela.
- FRANCO, W. 1979. Producción de hojarasca en varios tipos de bosque en Caparo, su ritmicidad durante un año, su composición química. Trabajo de Ascenso. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 230 p.
- GIMÓN, M. 1995. *Muestreo de plantación de saquisqui (método Caparo) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas, Venezuela*. Informe de pasantías. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 305 p.
- GUEVARA, A. 1997. Factibilidad de las plantaciones de apamate *Tabebuia rosea* (Bertol) DC. bajo el método Caparo como opción silvicultural para los Llanos Occidentales de Venezuela. Trabajo de grado. Maestría en manejo de Bosques. Cefap, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 94 p.
- JEREZ, M. y L. VINCENT. 1991. Muestreo continuo de rendimiento en plantaciones en líneas "Método Caparo" en la Reserva Forestal de Caparo (Barinas, Venezuela). *Cuadernos del Comodato ULA-MARNR N° 18*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 79 p.
- JEREZ, M. y L. VINCENT. 1995. Plantaciones en líneas Método Caparo de 20 años de edad en la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 39 (1): 25-33.
- KVÁLSETH, T. 1985. Cautionary note about R^2 . *American Statistician* 39: 279-285.
- LITTELL, R., G. MILLIKEN, W. STROUP, R. WOLFINGER y O. SCHABENBERGER. 2006. *SAS® for Mixed Models, Second Edition*. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 814 p.
- MAYER, D.G. y D.G. BUTLER. 1993. Statistical validation. *Ecological Modeling* 68: 21-32.
- MORET, A. Y. y P. RUIZ. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para mureillo (*Erismia uncinatum*) en la Unidad C-4 de la Reserva Forestal de Imataca. *Revista Forestal Venezolana* 42(2): 187-197.
- MORET, A. Y., M. JEREZ y A. MORA. 1998. Determinación de Ecuaciones de Volumen para Plantaciones de Teca (*Tectona grandis L.*) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- MURILLO, O. 1991. Metodología para el control de la calidad de plantaciones forestales. *Tecnología en Marcha* 11 (1): 19 - 30.
- PEÑA, J. 1996. *Evaluación de una plantación de apamate Método Caparo mediante técnicas multivariantes*. Trabajo de grado. Maestría en Manejo de Bosques. Cefap, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 107 p.
- PUCCHINI, J. 2003. *Evaluación de plantaciones en líneas "Método Caparo" a los 28 años de edad en el Área Experimental Caparo, Estado Barinas, Venezuela*. Informe de pasantía. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 31 p.
- ROSALES, L. y G. MARATÓN. 2000. Ecuaciones de Volumen y Peso para *Gmelina arborea* en Smurfit Cartón de Venezuela. Boletín Informativo N° 22. Acarigua, Venezuela. 27 p.
- SAS®INSTITUTE INC. 2004. User's Guide, Versión 9.0, Institute Inc., SAS/QC©Cary, NC: SAS Institute Inc. 3028 p.
- VINCENT, L. 2000. Métodos cuantitativos de planificación silvicultural. Segunda parte. Consejo de Estudios de Postgrado. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 197 p.
- VINCENT, L. y C. BUSTAMANTE. 1973. Método Limba ensayado en el Proyecto Caparo. *Revista Forestal Venezolana* 23: 101-104.