

BIOMASA AÉREA Y FACTORES DE EXPANSIÓN EN PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES DE *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

ABOVEGROUND BIOMASS AND EXPANSION FACTORS IN COMMERCIAL FOREST PLANTATIONS OF *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Jonathan Hernández-Ramos¹, H. Manuel De los Santos-Posadas^{1*}, J. René Valdez-Lazalde¹, J. Carlos Tamarit-Urias², Gregorio Ángeles-Pérez¹, Adrián Hernández-Ramos¹, Alicia Peduzzi³, Omar Carrero⁴

¹Ciencias Forestales. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (hectorm.delossantos@gmail.com y forestjonathanhdez@gmail.com).

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo experimental San Martinito, Tlhuapan, Puebla, México. C.P. 74060. (tamarit.juan@inifap.gob.mx).

³United States Department of Agriculture Forest, Service. Techniques Analyst, 507 25th Street, Ogden, Utah, United States. (apeduzzi@fs.fed.us). ⁴Proteak-Brasil. (ocarrero@gmail.com)

RESUMEN

La biomasa aérea es fundamental para determinar la cantidad de carbono almacenado en la cubierta forestal. Una forma de obtener estimaciones precisas de biomasa aérea es mediante factores de expansión, que utilizan datos de volumen de árboles en pie, tomados durante el inventario forestal. El objetivo de este estudio fue estimar la biomasa aérea total y por componente estructural a partir de modelos alométricos y factores de expansión de biomasa (FEB), y evaluar la aplicabilidad en inventarios forestales para clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake de plantaciones forestales comerciales en Tabasco, México. Mediante un muestreo al azar en siete plantaciones se seleccionaron 93 árboles, de uno a siete años de edad, y se determinó la biomasa total y de los componentes estructurales. Dos sistemas de modelos alométricos ajustados se propusieron como ecuaciones aparentemente no relacionadas para estimar la biomasa aérea. El porcentaje promedio de biomasa de fuste (B_f), ramas (B_r) y follaje (B_j) fue 91.42, 5.54 y 2.03 respecto a la biomasa total (B_t). La proporción B_j aumentó con las dimensiones del árbol y B_r y B_f disminuyeron desde los tres años de edad. El FEB promedio de B_r y B_f fue 510.09 kg m^{-3} y 472.56 kg m^{-3} de volumen de fuste y el factor de conversión biomasa de fuste a biomasa total fue 1.17. Con datos de un inventario forestal se estimaron en promedio $156.08 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de volumen maderable y 80 Mg ha^{-1} de biomasa aérea en las plantaciones. Los estadísticos de ajuste, sesgo y diferencia agregada en porcentaje indicaron

ABSTRACT

Aboveground biomass is critical to assess the amount of carbon stored in forest covers. One way to obtain accurately estimates of the aerial biomass is through expansion factors, which use standing trees volume data, taken during forest inventories. Our objective in this study is to estimate total and structural aerial biomass using allometric models and biomass expansion factors (FEB), in order to evaluate their applicability in forest inventories for *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake clones in commercial forest plantations at Tabasco, Mexico. Random samplings on seven plantations was utilized to select 93 trees, from one to seven years old trees, from which the total biomass and structural components were determined. We propose two systems allometric models fitted as seemingly unrelated equations in order to estimate aerial biomass. The average bole biomass percentage (B_f), branches (B_r) and foliage (B_j) was of 91.42, 5.54 and 2.03 respect to the total biomass (B_t). The B_j ratio increased with tree size and B_r and B_f decreased after three years. The average FEB of the B_r and B_f was 510.09 kg m^{-3} and 472.56 kg m^{-3} of bole volume. The biomass conversion factor from the bole to total biomass was 1.17. Data from a forest inventory allowed to estimate an average of $156.08 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ of timber volume and 80 Mg ha^{-1} of aerial biomass in the plantations. The fitting, bias and percentage of aggregate difference statistics indicated that the proposed systems are reliable for aerial biomass estimation.

Key words: cellulosic, *Eucalyptus urophylla*, forest inventories, forest management, allometric relations.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2016. Aprobado: abril, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 51: 921-938. 2017.

que los sistemas propuestos son confiables para la estimación de biomasa aérea.

Palabras clave: celulósicos, *Eucalyptus urophylla*, inventarios forestales, manejo forestal, relaciones alométricas.

INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal permite caracterizar la capacidad acumulativa de materia orgánica en los ecosistemas en el tiempo (Eamus *et al.*, 2000) y cuantificar los nutrimentos almacenados en los tejidos de la planta o del tipo de vegetación (Fonseca *et al.*, 2009). Estas estimaciones se usan en estudios de eficiencia nutricional y evaluación de las funciones ambientales y servicios ecosistémicos de los bosques naturales (Ferrere *et al.*, 2014) o plantaciones forestales.

La biomasa acumulada en un bosque o plantación es un indicador del crecimiento vegetal y del C fijado (Návar, 2009). Esta información es necesaria para valorar la contribución de las cubiertas vegetales en la reducción de gases con efecto invernadero (Fonseca *et al.*, 2009) y en la planeación regional del manejo forestal sustentable (Kauffman *et al.*, 2009; Cutini *et al.*, 2013), ambos enfocados a reducir los impactos del cambio climático en el planeta (Malhi y Grace, 2000; Snowdon *et al.*, 2001) planteados en el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998).

La biomasa en los ecosistemas forestales se divide en biomasa aérea (fuste, ramas y follaje) y biomasa subterránea (raíces), esta última es la más costosa y complicada de estudiar (Gárete y Blanco, 2013). La biomasa aérea de un árbol se define como la suma de la cantidad total de materia orgánica de hojas, ramas, tronco y corteza (Garzuglia y Saket, 2003) y puede calcularse con métodos directos e indirectos (Vásquez y Arellano, 2012). De ellos el primero es el más empleado (Díaz-Franco, 2007). Cuando la estimación corresponde a un bosque, la muestra debe considerar variables dasométricas, edad, calidad de sitio, composición de especies, y condiciones climáticas, edáficas y topográficas (Avendaño-Hernández *et al.*, 2009), o el tipo de clones establecidos en las plantaciones forestales comerciales (PFC), para mejorar la estimación por cada condición específica.

Los modelos alométricos son herramientas para estimar biomasa y C capturado en los bosques (Návar, 2010). Esas funciones usan la correlación

INTRODUCTION

Forest biomass allow to characterize the cumulative capacity of organic matter of the ecosystems over time (Eamus *et al.*, 2000) and quantify the stored nutrients in plant tissues or vegetation type (Fonseca *et al.*, 2009). These estimates are used on nutritional efficiency studies and for the evaluation of the environmental functions and ecosystem services of natural forests (Ferrere *et al.*, 2014) or forest plantations.

The accumulated biomass in a forest or plantation is an indicator of the plant growth and the fixed C (Návar, 2009). This information is necessary to assess the contribution of the vegetation cover to the reduction of greenhouse gases (Fonseca *et al.*, 2009) and regional planning of sustainable forest management (Kauffman *et al.*, 2009; Cutini *et al.*, 2013). Both are focused on reducing the impacts of climate change on the planet (Malhi and Grace, 2000; Snowdon *et al.*, 2001) raised by the Kyoto Protocol (United Nations, 1998).

Biomass in forest ecosystems is divided into aerial (stem, branches, and foliage) and underground biomass (roots); the latter is the most costly and complicated to study (Gárete and Blanco, 2013). The aboveground biomass of a tree is the sum of the total amount of organic matter of the leaves, branches, bole, and bark (Garzuglia and Saket, 2003). It is calculated with direct and indirect methods (Vásquez and Arellano, 2012). Of these, the first is the most employed (Díaz-Franco, 2007). When an estimation is needed at a forest level, the sample should consider dasometric variables, age, site quality, species composition, as well as climatic, edaphic and topographic conditions (Avendaño-Hernández *et al.*, 2009) or the type of clones established in commercial forest plantations (CFPs) to improve the estimates of each specific condition.

Allometric models are tools to estimate biomass and captured C in forests (Návar, 2010). These functions use correlations between variables difficult to measure, such as volume (V), C, equivalent C (CO_{2e}), green and dry biomass of each component, and with easy to measure variables such as: the average diameter (*ad*) and total height (*TH*) of the trees (Solano *et al.*, 2014). The above in combination with forest inventory data and growth and yield functions, allometric equations allow to quantifying

entre variables que son difícil de medir, como volumen (V), C , C equivalente (CO_2), biomasa verde y biomasa seca de cada componente, y con variables fáciles de medir, como el diámetro normal (dn) y la altura total (AT) de los árboles (Solano *et al.*, 2014). En combinación con datos de inventarios forestales y algunas funciones de crecimiento y rendimiento, las ecuaciones alométricas permiten cuantificar el potencial de crecimiento vegetal y fijación de gases con efecto invernadero, es decir el CO_2 capturado durante la fotosíntesis; además, representan una alternativa de valoración de las áreas forestales para el pago de servicios ambientales por captura y secuestro de CO_2 (Ruíz-Aquino *et al.*, 2014).

El objetivo del estudio fue estimar la biomasa aérea total y por componente estructural a partir de modelos alométricos y factores de expansión de biomasa (FEB's); además, evaluar la aplicabilidad en inventarios forestales para clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake de PFC de Tabasco, México. La hipótesis fue que a través de cualquiera de los métodos utilizados es posible estimar con precisión la biomasa aérea por árbol y por unidad de superficie.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Las plantaciones evaluadas de *E. urophylla*, con labores culturales, sin intervención silvícola y densidad de 1100 plantas por ha están en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México (17° 55' N, 94° 06' O y altitud promedio de 30 m). En la región existen estaciones con lluvia y secas, con clima cálido húmedo (Am), temperatura media anual de 26 °C y precipitación de 2500 mm. Los suelos son de tipo Feozem con relieve de tipo lomerío (INEGI, 2005).

Selección y medición de la muestra

Para recolectar la información se realizó un muestreo completamente al azar en siete plantaciones dispersas de *E. urophylla*, en el cual se seleccionaron y destruyeron 93 árboles clonales, de uno a siete años de edad, elegidos por la condición morfológica superior dentro de las plantaciones y tratando de cubrir la variabilidad mayor de edades y crecimiento. En todos los árboles se midió el diámetro normal (dn) antes de derribarlos, y luego se midió su altura total (AT), diámetro y altura de tocón (dt y Ate), los diámetros basales (db) por rama y a la altura de inserción en el fuste (Adb). Todas las mediciones se registraron en metros.

the potential for plant growth and greenhouse gases fixation, *i.e.*, the CO_2 captured during photosynthesis; in addition, these represent a valuation alternative for forest areas for environmental services payment for CO_2 capture and sequestration (Ruíz-Aquino *et al.*, 2014).

This study aims to estimate the total and structural aerial biomass using allometric models and FEBs; also, we evaluate their applicability in forest inventories for *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake clones of CFP in Tabasco, Mexico. We hypothesized that using any of the methods, it is possible to estimate the aerial biomass per tree accurately and by surface unit area.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The evaluated plantations was of *E. urophylla*, with cultural activities, without silvicultural intervention and an initial density of 1100 plants per ha. It is located in the municipality of Huimanguillo, Tabasco, Mexico (17° 55' N, 94° 06' W, 30 m mean altitude). The region has rain and dry seasons, with warm, humid climate (Am), mean annual temperature of 26 °C and 2,500 mm precipitation. The soils are Feozem type with a hill relief type (INEGI, 2005).

Sample selection and assessment

A random sampling was carried out in seven dispersed *E. urophylla* plantations, in which 93 clonal trees, one to seven years old, were destructively sampled. These were selected by their top morphological condition in the plantations. This sampling tried to cover the span of trees growth and age variability. On each tree, before timbered, we measured diameter at breast height (dn), and after being fell, their total height (AT), stump diameter and height (dt and Ate), basal diameters (db) per branch and at the bole insertion height (Adb). All measurements were recorded in meters.

Component separation

Bole with bark, branches, and foliage were separated and weighed to obtain the green weight (Fw , in kg), following the methodology proposed by Avendaño-Hernández *et al.* (2009) and Gómez-Díaz *et al.* (2011). We then sectioned the trunk in one-meter length logs, starting at stump-height up to the tip. Each section was weighed on an electronic platform scale (100 kg

Separación por componentes

Fuste con corteza, ramas y follaje se separaron y pesaron para obtener el peso “verde” de las muestras en campo (P_v , en kg) con la metodología propuesta por Avendaño-Hernández *et al.* (2009) y Gómez-Díaz *et al.* (2011). El fuste se seccionó en trozas de un metro de longitud, iniciando en la altura del tocón hasta la punta, cada sección se pesó en una báscula electrónica con plataforma (capacidad de 100 kg y precisión de 0.001 kg). También se obtuvieron tres rodajas de 5 cm de grosor correspondientes al tocón, parte media y punta del fuste de cada árbol. Las ramas y el follaje se separaron y pesaron en una báscula electrónica (capacidad de 5 kg y precisión de 0.001 kg). Una muestra de ramas y follaje, de aproximadamente 0.5 kg, se seleccionó para determinar la relación entre el peso verde y peso seco. Este último se determinó en laboratorio. La metodología fue documentada por Ruíz-Aquino *et al.* (2014) y Soriano-Luna *et al.* (2015).

Estimación de volumen con corteza y biomasa aérea

El volumen de cada sección o troza (V_{troza}) se obtuvo con la fórmula de Newton y el volumen de punta (V_{punta}) con la fórmula del cono. El volumen total del árbol (V_t) se calculó con el método de trozas traslapadas propuesto por Bailey (1995). Las muestras de ramas y hojas se deshidrataron a 72 °C y las rodajas a 105 °C, hasta alcanzar un peso constante, en una estufa para secado. Los pesos se registraron con una precisión de 0.001 kg. Con el peso húmedo y seco se determinó el contenido de humedad por componente y la relación entre ellos. La biomasa área total se definió como la suma del peso seco de los tres componentes (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2013); además, se determinó el promedio de proporción de biomasa por componente con respecto a la biomasa total.

Análisis exploratorio de la muestra

Un análisis exploratorio de las variables independientes (dn y AT) y las dependientes (B_r , B_b , B_p , B_t y V) mostró la variabilidad amplia de las dimensiones de los individuos (Cuadro 1).

Ajuste de modelos de biomasa y análisis estadístico

Previo al ajuste se verificó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk (SW) ($\alpha=5\%$). Aquí se planteó que si H_0 igual o menor que α , se aceptaría el supuesto de normalidad de la información y se rechazaría H_0 , y si H_1 era mayor que el nivel de significancia de α se concluiría falta de normalidad de los datos, con lo que se aceptaría H_0 . Además, para corregir la heterocedasticidad, se incluyó una función de ponderación basada

capacidad with 0.001 kg precision). Three 5 cm thick slices were obtained stump, middle and tip of each tree trunk. Branches and foliage were then separated and weighed on an electronic scale (5 kg capacity, 0.001 kg precision). A sample of branches and foliage, about 0.5 kg, was selected to determine the relationship between green and dry weight. The latter determined in a laboratory. We followed the methodology documented by Ruíz-Aquino *et al.* (2014) and Soriano-Luna *et al.* (2015).

Bark and aerial biomass volume estimation

We calculate the volume of each log or section (V_{log}) with the Newton formula and the tip volume (V_{tip}) with the cone volume formula. The total tree volume (V_t) was calculated using the overlapping log method proposed by Bailey (1995). The samples of the branches and leaves were dehydrated in a drying oven at 72 °C and the slices at 105 °C until constant weight was reached. The weights were then recorded with an accuracy of 0.001 kg. Wet and dry weight determined the moisture content per component and the relationship between them. The total aerial biomass was the sum of the dry weight of the three components (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2013). In addition, the average biomass proportion per component was determined respect to the total biomass.

Exploratory analysis of the samples

An exploratory analysis of the dependent (B_r , B_b , B_p , B_t and V) and independent (dn and AT) variables showed the wide dimensional variability of the of individuals (Table 1).

Fitting of biomass models and statistical analysis

Before the fitting, the data were normalized with the Shapiro-Wilk (SW) test ($\alpha=5\%$). Here we propose that, if H_0 is equal to or less than α , the information normality assumption is accepted, and the H_1 rejected. If H_1 was greater than the significance level of α , we would then conclude that the data was not normal, and the H_0 accepted. In addition, to correct heteroskedasticity, a weighting function based on the combined variable (dn^2AT), as a weight in the residuals ($\sigma^2=x_i^k$) (Neter *et al.*, 1996; Álvarez-González *et al.*, 2007): where σ_i^2 is the residual variance of the independent variable (x) and k is the optimization exponent value. The above consists in using the squared errors adjusted model without the $\hat{\epsilon}_i^2$ weight as a dependent variable in the error variance potential model (Harvey, 1976).

We tested linear and nonlinear models for the total biomass and by structural component (Loetsch *et al.*, 1973, Segura and Andrade, 2008, Méndez-González *et al.*, 2011, Gómez-García

Cuadro 1. Valores de estadísticos básicos de las variables de los árboles muestreados en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla*, con uno a siete años de edad en Huimanguillo, Tabasco, México.
Table 1. Basic statistical values of the variables of trees sampled in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla*, with one to seven years of age in Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	SD
dn (m)	0.172	0.332	0.078	0.058
AT (m)	21.003	33.300	8.540	7.011
B_f (kg)	128.931	413.197	16.256	105.381
B_r (kg)	10.474	31.751	3.104	5.328
B_b (kg)	3.997	7.631	1.170	1.668
B_t (kg)	143.402	435.564	26.684	108.905
V (m ³)	0.327	0.903	0.020	0.240

Dn : diámetro normal, AT : altura total, B_f : biomasa de fuste, B_r : biomasa de ramas, B_b : biomasa de follaje, B_t : es la biomasa total, V : volumen, SD: desviación estándar de la media. ♦ dn : diameter at breast height, AT : total height, B_f : bole biomass, B_b : branches biomass, B_r : foliage biomass, B_t : total biomass, V : volume, SD : mean standard deviation.

en la variable combinada (dn^2AT), como peso en los residuales ($\sigma^2 = x_i^k$) (Neter *et al.*, 1996; Álvarez-González *et al.*, 2007): donde σ_i^2 es la varianza residual de la variable independiente (x) y k es el valor del exponente de optimización, que consiste en usar los errores al cuadrado, del modelo ajustado sin peso $\hat{\epsilon}_i^2$ como variable dependiente, en el modelo potencial de varianza del error (Harvey, 1976).

Modelos de tipo lineal y no lineal se ensayaron para modelar la biomasa total y por componente estructural (Loetsch *et al.*, 1973; Segura y Andrade, 2008; Méndez-González *et al.*, 2011; Gómez-García *et al.*, 2013). Estos modelos incluyeron como variables independientes a dn y AT . Además, se probó un modelo general que considera dt , Atc , la altura y diámetro del fuste limpio (Afl y dfl) y la sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas en el árbol (Σdb) (Cuadro 2).

El ajuste estadístico de las ecuaciones 1 a 4 se realizó con el procedimiento MODEL, de SAS 9.2, mediante mínimos cuadrados ordinarios (SAS Institute Inc., 2008). La elección del modelo más eficaz se basó en los valores menores de la raíz del cuadrado medio del error ($RCME$) y valor mayor del coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros (R^2a).

Los cuatro modelos seleccionados por componente estructural se ajustaron simultáneamente con la técnica de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR o seemingly unrelated regressions). Esto lo consideró Álvarez-González *et al.* (2007) al incluir como variables endógenas o dependientes a las y y exógenas a las variables medidas directamente en el bosque. De esta forma en el ajuste se involucraron los errores conjuntos y se obtuvieron estimadores consistentes en los componentes de biomasa (Hernández *et al.*, 2013), además de los estadísticos de ajuste $RCME$, R^2a , significancia de los parámetros y error estándar aproximado (EEa) (Álvarez-González *et al.*, 2005).

et al., 2013). These models included dn and AT as independent variables. Also, we tested a general model that considers sd , sh , height and diameter of the clean shaft (Afl and dfl) and the summation of the basal diameters of all living branches in the tree (Σdb) (Table 2)

Statistical fittings performed to equations 1 to 4 were by using the MODEL procedure in the SAS 9.2 statistical package using ordinary least squares (SAS Institute Inc., 2008). Then based on the smallest values of the square root of the mean error (SMER) and the highest value of the coefficient of determination adjusted for the number of parameters (R^2a) the most efficient model was determined.

The four models, selected by structural component, simultaneously fitted as a system of seemingly unrelated equations. Álvarez-González *et al.* (2007) considered it by including the y as endogenous or dependent variables and exogenous variables

Cuadro 2. Modelos ajustados para estimar la biomasa total y por componente estructural.
Table 2. Fitted models to estimate total biomass and by structural component.

Expresión del modelo	Número
$y = b_0 + b_1 dn^2 + b_2 AT + b_3 dn^2 AT + \epsilon$	1
$y = b_0 + b_1 dn + b_2 AT + \epsilon$	2
$y = b_0 dn^{b_1} AT^{b_2} + \epsilon$	3
$y = b_0 (dn^2 AT)^{b_1} + \epsilon$	4
$y = b_0 + b_1 dn + b_2 AT + b_3 Afl + b_4 dfl + b_5 Atc + b_6 dt + b_7 \Sigma db + \epsilon$	5

y : biomasa total o por componente estructural, b_i : parámetros a estimar, ϵ : término del error del modelo. ♦ y : total biomass or by structural component, b_i : parameters to be estimated, ϵ : term of the model error.

El modelo 5 incluyó las variables dt , Atc , Alf y dfl , además de la sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas en el árbol (Σdb) y se ajustó con los métodos de selección backward (eliminación hacia atrás) y forward (selección hacia adelante) como lo recomienda Volke (2008). Así, en el modelo se incluyen solo las variables que explican con precisión mayor la variable respuesta. El modelo más adecuado se seleccionó con los criterios de bondad de ajuste ya descrito, el valor menor del estadístico Cp de Mallows, el valor mayor en R^2 y la significancia parcial de la prueba de F .

La precisión en las estimaciones de biomasa total y por componente estructural de las mejores ecuaciones se evaluó a través del sesgo y la diferencia agregada en porcentaje, de acuerdo con Barrero *et al.* (2015), y de las formulas propuestas por Fonseca *et al.* (2007), Lencinas y Mohr-Bell (2007) y Vargas-Larreta *et al.* (2010).

Factor de expansión de biomasa (FEB)

El FEB se estimó de tres maneras. La primera fue a través del cociente de la biomasa aérea total y la biomasa del fuste (Dauber *et al.*, 2002). Esto permitió identificar la distribución y cambiar las proporciones de la biomasa área de los componentes estructurales del árbol o de la especie con el incremento de las dimensiones o la edad de los árboles. FEB se estimó con las fórmulas 6 y 7 (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012). Los resultados se sumaron y promediaron para definir FEB en las plantaciones por edad (E) y categoría diamétrica (CD).

$$FEB = \frac{B_f + B_h + B_r}{Bf} \quad (6)$$

$$FEB = \frac{Bt}{Bf} \quad (7)$$

donde B_f , B_h y B_r es la biomasa fuste, biomasa follaje y biomasa de ramas.

La segunda metodología para determinar FEB consideró la proporción directa del volumen (V , m^3) con respecto a la biomasa de fuste y a la biomasa total (kg) de cada árbol. FEB permite identificar las existencias volumétricas en las plantaciones en relación a la biomasa. El factor se estimó con la estructura estudiada por Ruíz-Aquino *et al.* (2014), para biomasa de fuste (expresión 8) y esa proporción se calculó con la biomasa total mediante la ecuación 9.

$$FEB = \frac{B_f}{V} \quad (8)$$

$$FEB = \frac{B_t}{V} \quad (9)$$

measured directly in the forest. In this way, the joined errors were included in the fitting, and consistent estimators obtained for the biomass components (Hernández *et al.*, 2013) in addition to the $SMER$, R^2 , significance parameters and approximate standard errors (EEa) fitting statistics (Alvarez-González *et al.*, 2005).

Model 5 included the sd , sh , Alf y dfl variables in addition to Σdb , and adjusted with the backward and forward selection methods, as recommended by Volke (2008). Thus, the model only included the variables that explain the response variable with precision. The best-fit model selected with the already described goodness of fit criteria had the lower value in the Mallows Cp statistic, the highest R^2 value, and F test partial significance.

The accuracy of the estimates of the total and structural biomass components of the best equations was evaluated through the bias and the aggregate difference in percentage, following Barrero *et al.* (2015), and the formulas proposed by Fonseca *et al.* (2007), Lencinas and Mohr-Bell (2007) and Vargas-Larreta *et al.* (2010).

Biomass expansion factor (BEF)

We estimated the BEF in three ways. The first was through the total aerial biomass ratio and bole biomass (Dauber *et al.*, 2002). This allow to identify the distribution and changes in the tree aerial biomass structural components, or the species with the dimensions or as tree age increase. BEF was then estimated using equations 6 and 7 (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012). The results were then added and averaged to define the BEF in the plantations by age (E) and diameter class (CD).

$$FEB = \frac{B_f + B_h + B_r}{Bf} \quad (6)$$

$$FEB = \frac{Bt}{Bf} \quad (7)$$

where B_s , B_f and B_b are: bole biomass, foliage biomass and branch biomass.

The second methodology to determine BEF considered the direct proportion of the volume (V , m^3) respect to each tree shaft biomass and total biomass (kg). BEF allows identifying the volumetric stocks in the plantations in relation to the biomass. The factor was estimated with the structure studied by Ruíz-Aquino *et al.* (2014) for stem biomass (expression 8) and that proportion was calculated with total biomass using equation 9.

$$FEB = \frac{B_f}{V} \quad (8)$$

En el tercer método para estimar FEB se definió la relación lineal de los componentes de biomasa con el volumen, donde el valor que multiplica al volumen es la biomasa promedio (kg) por m³ que puede obtenerse. Esta relación se representa con las expresiones 10 y 11, para biomasa total y de fuste, respectivamente.

$$B_t = \alpha_0 V \quad (10)$$

$$B_f = \alpha_1 V \quad (11)$$

donde α_0 y α_1 son los parámetros a estimar y representan FEB de biomasa total y fuste, respectivamente.

Comparación de los métodos de estimación de FEB

Los promedios estimados de B_t y B_f por árbol y población se sometieron a ANDEVA de una vía (Martínez-González *et al.*, 2006) para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas. Las hipótesis fueron: $H_0 = u_1 = u_2 = u_3$. Las medias de las estimaciones son iguales, aceptando la hipótesis de igualdad. $H_1 =$ al menos una de las medias es distinta y se rechaza la hipótesis de igualdad.

Al contrastar la hipótesis de igualdad de medias (u_i) por árbol y población, la regla de decisión que se aplicó fue con base en la significancia de F en la prueba de Duncan (P_d) agrupando la muestra por método con significancia del 5 %.

Inventario de biomasa aérea

Para observar la aplicabilidad de los resultados en un inventario forestal y los FEB, tres ecuaciones de volumen total generadas en la región de Huimanguillo, Tabasco, en 2015 (12), 2012 (13) y 2007 (14) se compararon y se emplean en las PFC clónales de *E. urophylla* para la estimación de volumen.

$$V = 0.326089(dn^2 AT)^{0.868193} \quad (12)$$

$$V = 0.000037 dn^{1.908525} AT^{1.056786} \quad (13)$$

$$V = 0.000066 dn^{1.706446} AT^{1.049807} \quad (14)$$

Para corroborar la aplicabilidad de las ecuaciones generadas en un inventario forestal, un análisis con datos de inventario se realizó con un diseño de muestreo simple aleatorio, los estimadores del inventario se obtuvieron en 28 sitios rectangulares, de 500 m², medidos en 2014, en siete plantaciones de *E. urophylla* de uno a siete años de edad. La comparación de los resultados se realizó mediante análisis de varianza entre las estimaciones con la prueba de t -Cramer con confiabilidad del 95 %, para verificar si los cálculos eran iguales entre sí.

$$FEB = \frac{B_i}{V} \quad (9)$$

In the third method, in order to estimate the BEF, we defined the linear relationship of the biomass components with the volume, where the value multiplying the mean biomass volume (kg) per m³ that can be obtained. This relation represented in expressions 10 and 11, for total biomass and stem biomass, each.

$$B_t = \alpha_0 V \quad (10)$$

$$B_f = \alpha_1 V \quad (11)$$

where α_0 and α_1 are the parameters to be estimated and represent the total and bole biomass BEF, respectively.

BEF estimation methods comparison

The estimated by tree and population B_t and B_s averages were analyzed on a one-way ANOVA (Martínez-González *et al.*, 2006) to determine the existence of significant statistical differences. The hypotheses were: $H_0 = u_1 = u_2 = u_3$. The means of the estimates are the same, accepting the equality hypothesis. $H_1 =$ at least one of the means is different, and therefore the equality hypothesis is rejected.

When the mean equality (u_i) hypothesis by tree and population is contrasted, the decision rule that applied was based on the F significance in the Duncan (P_d) test, grouping the sample by method with 5 % significance.

Aerial biomass inventory

In order to observe the applicability of the results in a forest inventory and the BEF, three equations of total volume generated in the Huimanguillo, Tabasco, region in 2015 (12), 2012 (13) and 2007 (14) were compared and used in the clonal CFPs of *E. urophylla* for volume estimation.

$$V = 0.326089(dn^2 AT)^{0.868193} \quad (12)$$

$$V = 0.000037 dn^{1.908525} AT^{1.056786} \quad (13)$$

$$V = 0.000066 dn^{1.706446} AT^{1.049807} \quad (14)$$

To corroborate the applicability of the generated equations in a forest inventory, we performed an analysis with inventory data on a simple random sampling design. The inventory estimators were obtained from 28,500 m² rectangular sites, surveyed in

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de biomasa aérea

La biomasa por componente estructural de las plantaciones promedió 43.0 %, 44.8 % y 37.8 % del peso en la cosecha de fuste, ramas y follaje. La distribución de biomasa por componente indicó que su proporción en el fuste y su volumen aumentaron con el incremento de *dn* y *AT*. Lo opuesto ocurrió con la proporción de biomasa de ramas y follaje (Ferrere *et al.*, 2008; Soriano-Luna *et al.* 2015).

Los árboles clonales de *E. urophylla* establecidos en PFC concentraron 92.42 % de la biomasa total en el fuste, 5.54 % en las ramas y 2.03 % en el follaje (Cuadro 3). Estos resultados contrastaron con los de Cerruto *et al.* (2015) de plantaciones de *E. grandis* en Brasil, pues a los 5.5 años de edad la proporción fue 82 % para fuste y 18 % para ramas, hojas y corteza. Gomes *et al.* (2013) señalaron intervalos máximos de biomasa en el fuste de *E. urophylla*, de 3.6 años de edad, 76.2 a 82.5 % en Brasil; Geldres *et al.* (2006) determinaron en plantaciones de *E. nitens*, de 4 a 7 años de edad, 84.1, 9 y 6.8 % de fuste, ramas y hojas. Álvarez-González *et al.* (2005) observaron en plantaciones de *E. globulus*, de 13 a 24 años, proporciones de 85.9 % de fuste y corteza y 11 y 3.1 % de ramas y follaje. Estos resultados permiten plantear

Cuadro 3. Distribución porcentual de biomasa por categoría diamétrica (CD) de los componentes estructurales en árboles de *Eucalyptus urophylla*.

Table 3. Biomass percentage distribution by diametric category (DC) of the structural components in *Eucalyptus urophylla* trees.

CD	B_b (%)	B_r (%)	B_f (%)	Total (%)
10	10.22	25.26	64.52	100
15	3.44	9.09	87.47	100
20	2.55	6.58	90.87	100
25	1.74	4.66	93.60	100
30	1.67	4.52	93.82	100
35	1.35	4.23	94.42	100
Promedio*	2.03	5.54	92.42	100

CD: categoría diamétrica (cm), B_b : biomasa de fuste, B_r : biomasa de ramas, B_f : biomasa de follaje, B_t : es la biomasa total, Promedio*: el promedio está representado para todos los diámetros. ♦ CD: diameter class (cm), B_b : Bole biomass, B_r : biomass of branches, B_f : biomass of foliage, B_t : total biomass, Average *: the mean is shown for all diameters.

2014, in *E. urophylla* seven plantations. Plants were one to seven years old. The performed comparison of the results was an analysis of variance between the estimates with the *t-Cramer* test with 95 % confidence, to verify if the calculations were equal to each other.

RESULTS AND DISCUSSION

Aerial biomass distribution

Biomass by structural component of the plantations had a mean of 43.0 %, 44.8 % and 37.8 % of harvest weight from the bole, branches, and foliage. The biomass distribution per component indicates that the proportion in the bole and its volume increased with the *dn* and *TH* increase. The opposite occurred with the proportion of branches and foliage biomass (Ferrere *et al.*, 2008, Soriano-Luna *et al.*, 2015).

Eucalyptus urophylla clones trees established in CFP concentrated 92.42 % of the total biomass in the shaft, 5.54 % in the branches and 2.03 % in the foliage (Table 3). These results contrasted with those of Cerruto *et al.* (2015) on *E. grandis* plantations in Brazil, because at the age of 5.5 years, the proportion was 82 % for the bole and 18 % for branches, leaves, and bark. Gomes *et al.* (2013) reported maximum shaft biomass ranges in 3.6 years old *E. urophylla*, 76.2 to 82.5 % in Brazil; Geldres *et al.* (2006) determined in *E. nitens* plantations, on 4 to 7 years old plants, 84.1 %, 9 % and 6.8 % of bole, branches and leaves. Álvarez-González *et al.* (2005) determined in *E. globulus* plantations, on 13 to 24 years old plants, proportions of 85.9 % of bole and bark, and 11 % and 3.1 % of branches and foliage. These results allow proposing a hypothesis for future research; comparatively, plantations have greater growth speed and greater photosynthetic efficiency.

Fitting and statistical analysis of biomass models

The first fitting indicated that the models are suitable for estimating B_b , B_r , B_f and B_t ; although with heteroscedasticity problems (Figure 1).

Correction by heteroscedasticity and models fitted with seemingly unrelated regressions (SUR) technique (Table 4) ensured the homogeneous distribution of the residuals in the variance of the constant errors (Figure 2). The first system of

una hipótesis para investigaciones futuras, comparativamente las plantaciones tienen velocidad mayor de crecimiento y eficiencia fotosintética mayor.

Ajuste y análisis estadístico de modelos de biomasa

El primer ajuste indicó que los modelos son adecuados para estimar B_f , B_r , B_b y B_t ; aunque con problemas de heterocedasticidad (Figura 1).

La corrección por heterocedasticidad y el ajuste de los modelos con la técnica de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) (Cuadro 4) garantizó la distribución homogénea de los residuales en la varianza de los errores constante (Figura 2). Con la corrección y ajuste nuevo de los modelos se construyó el primer sistema de ecuaciones de biomasa (SI).

equations of biomass (SI) was constructed with the correction and new adjustment of the models.

Three structural components and the total biomass in the SW test obtained values between 0.91 and 0.98. These values indicate that there was no normality violation of the regression, in all four cases. The result is similar to those reported by Balzarini *et al.* (2008) and applied by Gaillard *et al.* (2014).

Model 5, adjusted with the “backward” and “forward” regression procedures and variables selection, allowed to identify more appropriate models by including additional variables, which with greater precision explain the biomass prediction of branches and foliage:

$$B_r = c_0 + c_1 dn + c_2 Aft + c_3 \Sigma db \tag{15}$$

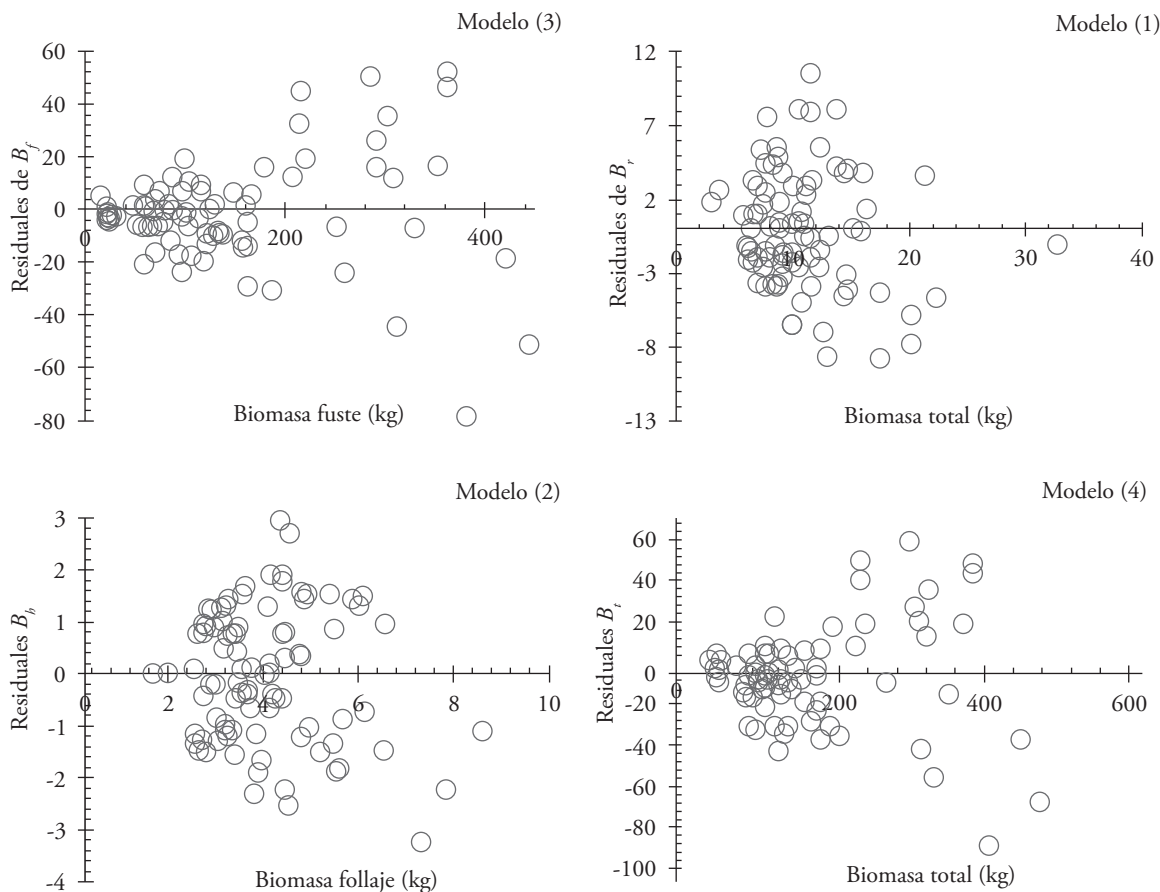


Figura 1. Distribución de residuales de modelos utilizados para estimar la biomasa de cada componente estructural y la total en *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Figure 1. Residual distribution from models used to estimate the biomass of each structural component and the total in *Eucalyptus urophylla* at Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Cuadro 4. Valores de ajuste y parámetros de los modelos de biomasa para árboles clonales de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.
Table 4. Goodness of fit and parameter estimates of the biomass models for clonal trees of *Eucalyptus urophylla* in Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Modelo	Componente	RCME	R ² a	Parámetro	Estimación	EEa	Valor t	Pr> t
3	B _f	18.890	0.968	b ₀	31.084	6.710	4.63	<0.0001
				b ₁	1.312	0.045	29.04	<0.0001
				b ₂	1.170	0.053	22.16	<0.0001
1	B _r	3.890	0.467	b ₀	7.567	1.353	5.59	<0.0001
				b ₁	827.945	68.120	12.15	<0.0001
				b ₂	-0.527	0.075	-6.98	<0.0001
2	B _h	1.289	0.403	b ₃	-16.104	1.893	-8.51	<0.0001
				b ₀	1.999	0.375	5.33	<0.0001
				b ₁	44.660	3.843	11.62	<0.0001
4	B _t	23.055	0.955	b ₂	-0.271	0.029	-9.19	<0.0001
				b ₀	179.363	2.907	61.69	<0.0001
				b ₁	0.751	0.017	43.10	<0.0001

B_f, B_r, B_h y B_t; biomasa del fuste, ramas, hojas y total, respectivamente RCME: raíz del cuadrado medio del error. R²a: coeficiente de determinación ajustado. EEa: error estándar aproximado de los parámetros, Valor de t: valor de la distribución de t de Student, Pr>|t|: probabilidad asociada al valor de t de Student. ♦ B_s, B_b, B_f and B_t; Bole, branches, leaves and total biomass, each. RMSE: root mean squared error. R²a: adjusted coefficient of determination. EEa: approximate standard error of the parameters. t Value: value of the Student t distribution, Pr>|t|: probability associated with the Student t value.

Para los tres componentes estructurales y la biomasa total en la prueba de SW se obtuvieron valores entre 0.91 y 0.98. Estos valores señalan que no hubo violación del supuesto de normalidad de la regresión, en los cuatro casos. El resultado es similar a lo que describieron Balzarini *et al.* (2008) y aplicaron Gaillard *et al.* (2014).

El modelo 5, ajustado con los procedimientos de regresión y selección de variables “backward” y “forward”, permitió identificar los siguientes modelos más adecuados al incluir variables adicionales, que explican con precisión mayor la predicción de la biomasa de ramas y follaje:

$$B_r = c_0 + c_1 dn + c_2 Afl + c_3 \sum db \tag{15}$$

$$B_h = c_0 \sum db^{c_1} dt^{c_2} Afl^{c_3} \tag{16}$$

Estos modelos se ajustaron simultáneamente y corrigieron por heterocedasticidad con la función de potencia (Figura 3); lo anterior originó un segundo sistema de ecuaciones (SII) para la estimación de biomasa de fuste (3), biomasa total (4) y biomasa de ramas y follaje (15 y 16). Este sistema tuvo ajuste estadístico mayor (Cuadro 5); lo que lo hace estadísticamente más confiable. La prueba de SW demostró

$$B_h = c_0 \sum db^{c_1} dt^{c_2} Afl^{c_3} \tag{16}$$

These models were simultaneously fitted and corrected for heteroskedasticity with the power function (Figure 3); the latter gave rise to a second system of equations (SII) were used for the stem (3), total (4), and branches and foliage (15 and 16) biomass estimation. This system had a greater statistical fit (Table 5), which makes it statistically more reliable. The SW test showed the normality of the data with values between 0.91 and 0.97 for the four adjusted models.

According to the results, although the parameter values of the selected models were close, SII slightly overestimated B_r, B_b and B_t. The B_f estimation was conservative in the prediction per individual and the total difference per sample. The first system (SI) according to the value of the precision statistics underestimated all the variables and made conservative biomass aerial calculations (Table 6).

Due to the accuracy of the adjustment statistics of the equation systems (SI and SII), since they were generated to estimate the total aerial biomass and its components, without using destructive methods, the total biomass and by components can be estimated with information of traditional forest inventory or

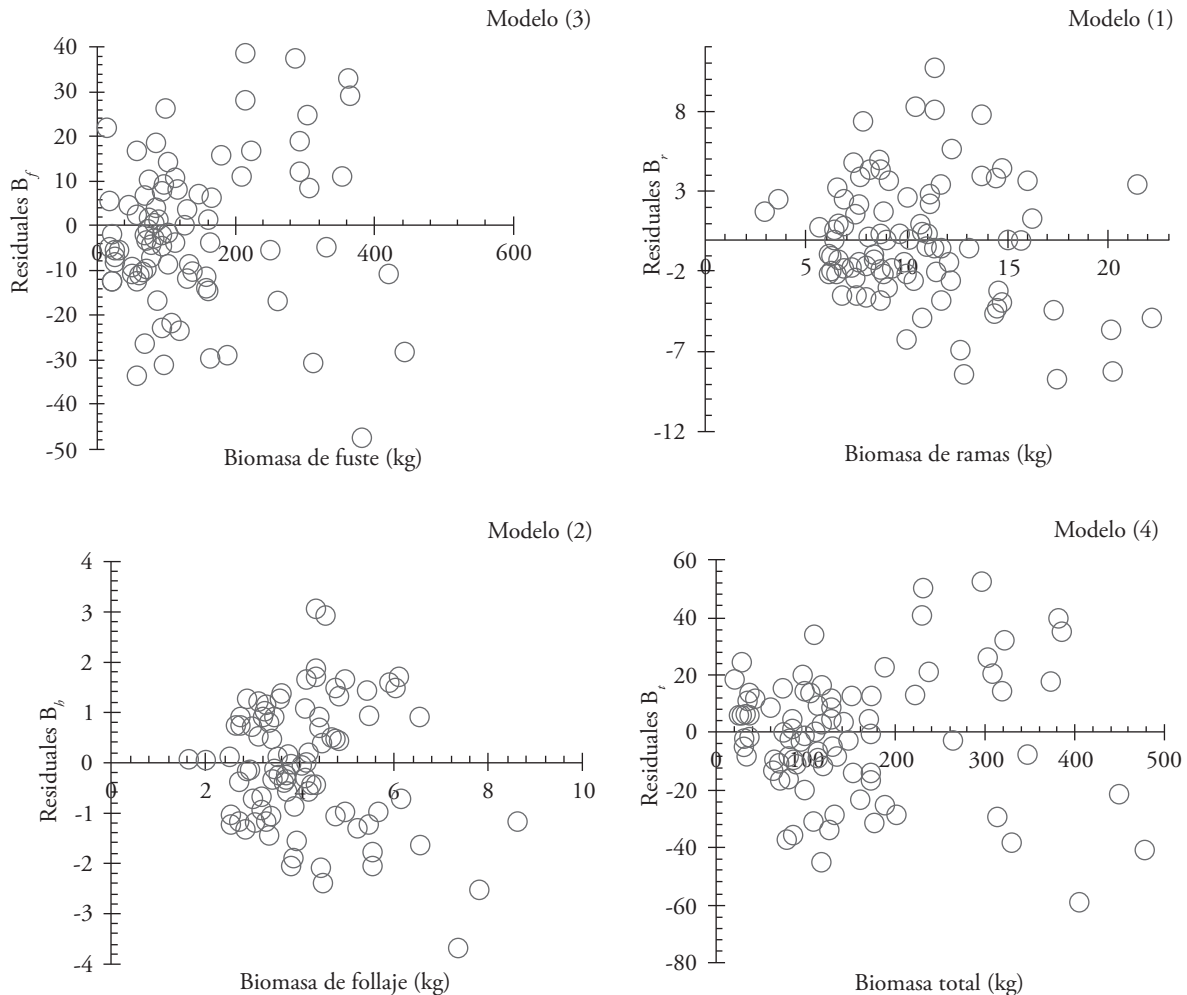


Figura 2. Distribución de residuales corregidos por heterocedasticidad de los modelos utilizados para estimar la biomasa por componente estructural y total en *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Figure 2. Distribution of residuals corrected for heteroskedasticity of the models used to estimate the biomass by structural and total components in *Eucalyptus urophylla* at Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

la normalidad de los datos con valores entre 0.91 y 0.97 para los cuatro modelos ajustados.

Según los resultados, aunque los valores de los parámetros de los modelos seleccionados son cercanos, SII sobreestimó ligeramente B_f , B_r y B_p , y la estimación de la B_h fue conservadora en la predicción por individuo y en la diferencia total por muestra. El primer sistema (SI) de acuerdo al valor de los estadísticos de precisión subestimó todas las variables e hizo conservadores los cálculos de biomasa aérea (Cuadro 6).

Debido a la precisión de los estadísticos de ajuste de los sistemas de ecuaciones (SI y SII) y porque se generaron para estimar biomasa aérea total y de sus componentes, sin utilizar métodos destructivos, pueden estimarse la biomasa total y de los componentes

with additional variables. These can be obtained through electronic measuring instruments such as the dendrometer (Criterium RD 1000®).

Biomass expansion factors (BEF)

The average BEF obtained with equations 6 and 7 showed that 17 % of the aerial biomass distributes in branches and foliage. The rest (83 %) is in the bole (Table 7). This distribution agrees with Téllez *et al.* (2008) of *E. urophylla* plantations in Oaxaca, Mexico, which reported 17.6 % biomass of branches and foliage, and 82.4 % in the trunk. The results from Álvarez *et al.* (2005) with *E. globulus*, in Spain, had 14.1 % of leaves and branches biomass, and

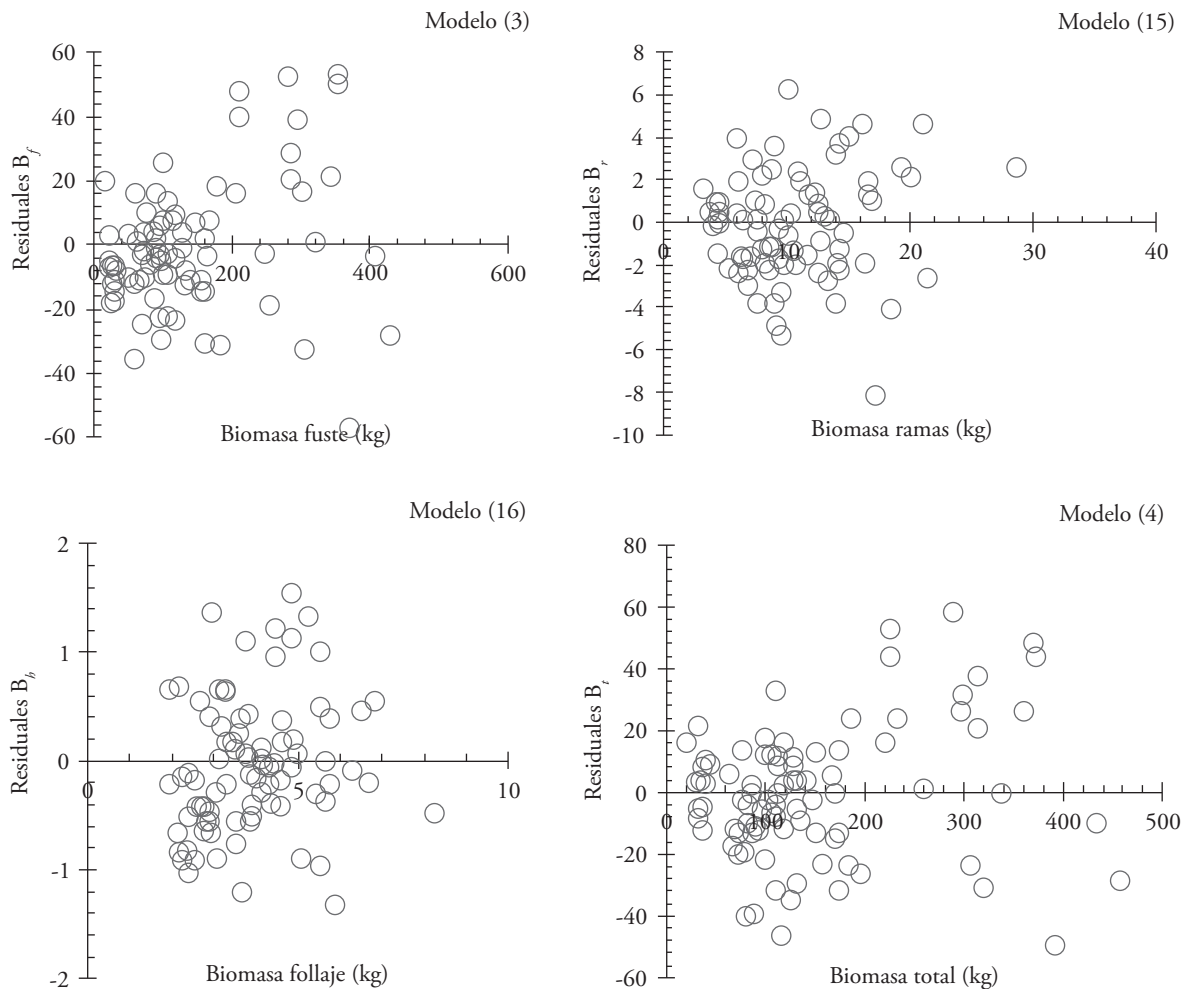


Figura 3. Distribución de residuales al corregir por heterocedasticidad los mejores modelos ajustados para estimar biomasa por componente estructural en *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.
Figure 3. Distribution of residuals when corrected for heteroskedasticity the best-fitted models to estimate biomass by structural component in *Eucalyptus urophylla* at Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

con la información de inventario forestal tradicional o con variables adicionales. Estas pueden obtenerse a través de instrumentos de medición electrónica, como el dendrómetro (Criterium RD 1000 °).

Factores de expansión de biomasa (FEB)

El FEB promedio obtenido con las ecuaciones 6 y 7 mostró que 17 % de la biomasa aérea se distribuye en ramas y follaje, y 83 % está en el fuste (Cuadro 7). Esta distribución concordó con lo reportado por Téllez *et al.* (2008) para plantaciones de *E. urophylla* en Oaxaca, México, con 17.6 % de biomasa de ramas y follaje y 82.4 % en fuste. Los resultados de Álvarez

85.9 % of trunk, and results of Ferrere *et al.* (2008) in Argentina, showed the biomass distribution in *E. viminalis* with 20 % in branches and foliage and 80 % in trunk.

Estimates with systems I and II underestimated 1.51 % and 1.48 % *BEF*. SII had better approximate evaluated values by diameter class, without considering the age of the plantation.

When considering age in the analysis, the SI, on average, had better approximations but underestimated the *BEF* by 2.5 %. In this case, we proposed that 19 % of biomass corresponded to branches and foliage, and 81 % to the trunk. This situation is similar to the biomass proportions by

Cuadro 5. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos al incluir las variables de altura de fuste limpio y sumatoria de los diámetros basales de las ramas por componente estructural de biomasa para *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Table 5. Parameters estimates and goodness of fit statistics to include the height of clean bole and summation variables of the basal diameters of branches by structural component biomass for *Eucalyptus urophylla* in Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Modelo	Componente	RCME	R ² a	Parámetro	Estimación	EEa	Valor t	Pr> t
3	B _f	17.629	0.968	b ₀	28.444	6.153	4.62	<0.0001
				b ₁	1.256	0.045	27.91	<0.0001
				b ₂	1.168	0.053	22.12	<0.0001
				c ₀	-4.224	0.927	-4.56	<0.0001
15	B _r	2.398	0.812	c ₁	95.979	6.544	14.67	<0.0001
				c ₂	-0.463	0.050	-9.31	<0.0001
				c ₃	5.957	0.843	7.07	<0.0001
				c ₀	24.993	4.654	5.37	<0.0001
16	B _b	0.830	0.745	c ₁	0.509	0.061	8.34	<0.0001
				c ₂	0.895	0.095	9.44	<0.0001
				c ₃	-0.110	0.027	-4.16	<0.0001
				b ₀	178.171	2.942	60.56	<0.0001
4	B _t	22.226	0.953	b ₁	0.726	0.018	39.60	<0.0001

B_f, B_r, B_b y B_t; biomasa de fuste, ramas, hojas y total, respectivamente, RCME: Raíz del cuadrado medio del error, R²a: coeficiente de determinación ajustado, EEa: error estándar aproximado. ♦ B_s, B_r, B_f and B_t; bole, branches, leaves and total biomass, each. SMER: root mean squared error. R²a: adjusted coefficient of determination. EEa: approximate standard error.

et al. (2005) con *E. globulus*, en España, fueron 14.1 % de biomasa de hojas y ramas y 85.9 % en fuste y los de Ferrere et al. (2008), en Argentina, mostraron la distribución de biomasa en *E. viminalis* con 20 % en ramas y follaje y 80 % en fuste.

Las estimaciones con los sistemas I y II subestimaron FEB en 1.51 % y 1.48 %. SII se aproximó mejor a los valores evaluados por categoría diamétrica, sin considerar la edad de la plantación.

Al considerar la edad en el análisis, SI, en promedio, tuvo aproximaciones mejores, pero subestimó FEB en 2.5 %. En este caso se propone que 19 % de biomasa correspondió a ramas y follaje y 81 % a fuste. Esta situación es semejante a lo referido en las proporciones de biomasa por componente estructural (Cuadro 8). En ambos sistemas FEB para *E. urophylla* decrecieron a medida que la biomasa total aérea aumentó (Rodríguez-Ortiz et al. 2012; Chávez-Pascual et al., 2013).

Con el modelo 8 de FEB, para B_f, el promedio de biomasa total por cada m³ de volumen maderable fue 600.94 kg, En este caso el factor disminuye con el incremento de las dimensiones de los árboles. Para las categorías diamétrica de 10 cm y 15 cm existieron en promedio 795.05 kg m⁻³, para 20 y 25 cm fue 557.94 82 kg m⁻³ y para 30 cm y 35 cm fue

structural component (Table 8). In both systems, the BEF for *E. urophylla* total aerial biomass decreased as the total area increased (Rodríguez-Ortiz et al., 2012; Chávez-Pascual et al., 2013).

With model 8 for BEF, for B_f, the average total biomass per m³ of timber volume was 600.94 kg. In this case, the factor decreases with the increase of the trees dimensions. For the diameter classes of 10 and

Cuadro 6. Estadísticos de evaluación de la capacidad predictiva de biomasa total y por componente de los sistemas de ecuaciones para *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Table 6. Evaluation statistics of the predictive capabilities of total biomass and by component of equation systems for *Eucalyptus urophylla* at Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Sistema de ecuaciones	Estadístico estimado	B _f	B _r	B _b	B _t
SI	Sesgo	-0.631	-0.056	-0.022	-0.431
	Diferencia agregada (%)	-0.494	-0.541	-0.542	-0.303
SII	Sesgo	0.475	0.073	-0.024	0.574
	Diferencia agregada (%)	0.372	0.701	-0.613	0.404

Cuadro 7. Factores de expansión de biomasa (FEB) por categoría diamétrica para datos de biomasa aérea.**Table 7. Biomass expansion factors (BEF) by diametric category for aerial biomass data.**

CD	10	15	20	25	30	35	Promedio
FEB Observado	1.58	1.16	1.11	1.07	1.07	1.06	1.17

Cuadro 8. Factores de expansión de biomasa (FEB) por edad, para datos de biomasa aérea.**Table 8. Biomass expansion factors (BEF) by age, for aerial biomass data.**

Edad	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
FEB Observado	1.60	1.31	1.13	1.09	1.11	1.08	1.20	1.22

447.82 kg m⁻³. Los resultados por edad indicaron que el promedio para estas plantaciones, con uno a siete años, fue 652.22 kg m⁻³, y presentaron tendencia semejante de 7 a 4 años de edad, con 531.06 kg m⁻³, a los 3 años 613.34 kg m⁻³ y aumentó a 812.25 kg m⁻³ en las plantaciones de 1 año de edad. Lo anterior se debe a la gran cantidad de biomasa foliar que tienen las plantaciones jóvenes.

En el caso de FEB para B_f , los promedios fueron 496.45 kg m⁻³ por CD y 503.02 kg m⁻³. Los resultados analizados por CD mostraron 508.76 kg m⁻³, 500.03 kg m⁻³ y 480.45 kg m⁻³ para las plantaciones con dimensiones de 10 y 15 cm, 20 y 25 cm, y 30 y 35 cm, respectivamente. En ambos casos FEB disminuyeron con el crecimiento de los árboles y el aumento de la edad. Esto se debió a que la acumulación de biomasa en el fuste aumenta conforme el individuo disminuye la biomasa aérea foliar, lo que sucede a medida que las categorías diamétricas o edades aumentan.

Los modelos (10) y (11) para estimar B_i y B_f que consideraron la relación lineal de estas variables con el volumen del árbol (m³) mostraron FEB de 510.06 kg m⁻³ y 472.54 kg m⁻³ (Cuadro 9). Estos resultados fueron semejantes a los de los modelos 8 y 9.

Comparación de métodos de estimación e inventario de biomasa aérea

Los resultados del análisis de varianza de las medias de los datos observados *versus* las tres estimaciones con SI y SII y los modelos de proporción directa, relacionados con el volumen (10 y 11) permitieron concluir que las variables B_i y B_f fueron iguales entre sí

15 cm there were on average 795.05 kg m⁻³, for 20 and 25 cm it was 557.94 kg m⁻³, and for 30 cm and 35 cm, it was 447.82 kg m⁻³. The results for age indicate that the average for these plantations, with 1 to 7 years, was 652.22 kg m⁻³, and exhibit a similar trend from 7 to 4 years of age, with 531.06 kg m⁻³, 613.34 kg m⁻³ at 3 years and increased to 812.25 kg m⁻³ in the 1-year-old plantations. This is due to the large amount of foliar biomass that young plantations have.

In the BEF case for B_f , the averages were of 496.45 kg m⁻³ per CD and 503.02 kg m⁻³. The results analyzed by CD showed 508.76 kg m⁻³, 500.03 kg m⁻³ and 480.45 kg m⁻³ for plantations with dimensions of 10 and 15 cm, 20 and 25 cm, and 30 and 35 cm, each. In both cases, BEF decreased with tree growth and age increase. This was due to the fact that the biomass accumulation in the stem increases as the individual decreases the aerial leaf biomass, which happens either as the diameter classes or ages increase.

The models (10) and (11) for estimating B_i and B_f that considered the linear relationship of these variables to the volume of the tree (m³) showed a BEF of 510.06 kg m⁻³ and 472.54 kg m⁻³ (Table 9). These results were similar to those of models 8 and 9.

Comparison of estimation methods and inventory of aerial biomass

The results of the analysis of variance of the means of the observed data *versus* the three SI and SII estimates and the volume-related direct proportion models (10 and 11) conclude that the variables B_i

Cuadro 9. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros de los modelos 10 y 11 para estimar B_t y B_s en árboles de *Eucalyptus urophylla* de PFC en Huimanguillo, Tabasco, México.**Table 9. Goodness-of-fit statistics and parameters of models 10 and 11 to estimate B_t and B_s in *Eucalyptus urophylla* trees in CFP at Huimanguillo, Tabasco, Mexico.**

Componente	Modelo	RCME	R^2 a	Parámetro	Estimación	EEa	Valor t	Pr> t
B_t	10	21.620	0.961	b_o	510.0913	3.901	130.75	<0.0001
B_s	11	16.992	0.974	b_s	472.5588	2.791	169.32	<0.0001

RCME: raíz del cuadrado medio del error, R^2 a: coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros, EEa: error estándar aproximado, b_o y b_s : parámetros estimados, Valor de t: valor de la distribución de t de Student, Pr>|t|: probabilidad asociada al valor de t de Student. ♦ RMSE: root mean squared error. R^2 a: determination coefficient adjusted by the number of parameters. EEa: approximate standard error. b_o and b_s : estimated parameters. t value: Student t distribution value. Pr>|t|: probability associated with the Student t-value.

(Pr>F=0.963 para B_t y Pr>F=0.997 para B_s). Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_o) y puede afirmarse que los tres métodos propuestos son estadísticamente iguales y confiables para estimar estas variables. Ellos difieren solo en la estructura matemática de los modelos.

Una comparación de resultados, tomando como referencia los modelos de biomasa de fuste y biomasa total de los modelos 3 y 4 del primer sistema de ecuaciones, demostró que el modelo de volumen 12 es el más adecuado para estimar la biomasa aérea con datos de un inventario, le siguió el modelo 13 y luego el 14 (Cuadro 10). El análisis de varianza entre las estimaciones, con la prueba de *t-Cramer*, indicó que son iguales entre sí, debido a que el valor de probabilidad en el ANDEVA fue alto (F=2.6887 y p=0.7978).

Los datos de inventario, analizados con los estadísticos de muestreo simple al azar, indicaron en promedio 156.08 m³ ha⁻¹ de volumen en PFC de *E. urophylla*, 14 cm en diámetro normal, 18 m de altura y densidad de 986 árboles ha⁻¹. Además, al incorporar los resultados del Cuadro 10 en el modelo 4 de B_t el volumen (m³ ha⁻¹) se estimó en 80.80 Mg ha⁻¹ de biomasa aérea. Esto concuerda con los 70.27 Mg ha⁻¹ de plantaciones de 7 años de *E. viminalis* en Argentina (Ferrere *et al.*, 2008). Pero, el valor es inferior a los rendimientos reportados en plantaciones de 5, 6 y 7 años de *E. nitens*, (rendimiento de 73.1, 111.8 y 159.5 Mg ha⁻¹), con densidad de plantación de 1,500 árboles por hectárea, antes de aclarearse (Geldres *et al.*, 2006).

La biomasa aérea por hectárea fue similar a los rendimientos (142 Mg ha⁻¹) estimados en plantaciones de *E. globulus* de España, pues la cantidad reportada en este estudio es, en promedio, la mitad

and B_s were equal to each other (Pr>F=0.963 for B_t and Pr>F=0.997 for B_s). Therefore, the null hypothesis (H_o) is accepted, and the three proposed methods are statistically equal and reliable to estimate these variables. They only differ in the mathematical structure of the models.

In a comparison of the results, taking as reference the bole biomass and total biomass of models 3 and 4 of the first system of equations, showed that the model 12 for volume is the most suitable to estimate the aerial biomass with inventory data, followed by model 13 and model 14 (Table 10). The analysis of variance between the estimates, with the *t-Cramer* test show that they are equal to each other because the probability value in the ANOVA test was high (F=2.6887 and p=0.7978).

The inventory data analyzed with simple random sampling statistics indicated an average of 156.08 m³ ha⁻¹ volume in CFPs of *E. urophylla*, 14 cm in normal diameter, 18 m height and 986 trees ha⁻¹ density. In addition, incorporating the results in Table 10 in the B_t model 4 (m³ ha⁻¹), the estimated volume was of 80.80 Mg ha⁻¹ of aerial biomass. This is consistent with the 70.27 Mg ha⁻¹ of 7-year-old *E. viminalis* plantations at Argentina (Ferrere *et al.*, 2008). However, the value is lower than the reported yield in 5, 6 and 7 years old plantations of *E. nitens* (yield of 73.1, 111.8 and 159.5 Mg ha⁻¹), with planting density of 1,500 trees per hectare, before (Geldres *et al.*, 2006).

The aerial biomass per hectare was similar to the yield (142 Mg ha⁻¹) estimated in plantations of *E. globulus* in Spain. Because the amount reported in this study is on average, half of the reported at 13 years old plantations by Álvarez *et al.* (2005). In addition,

Cuadro 10. Estimadores con el muestreo simple aleatorio para PFC de *Eucalyptus urophylla* de entre uno y siete años de edad establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México con los modelos 10 y 11.
Table 10. Simple random sampling estimates for *Eucalyptus urophylla* CFP between one and seven years old established at Huimanguillo, Tabasco, Mexico with models 10 and 11.

Variables	B_i (kg/sitio)			B_f (kg/sitio)			B_i (R)	B_f (R)
	Modelos de volumen empleados en la región						(kg/sitio)	(kg/sitio)
Estimadores de muestreo	12	13	14	12	13	14	3	4
Media	3.98	3.95	3.87	3.69	3.66	3.59	4.54	4.04
Varianza muestral	7160.79	8919.47	7551.23	6145.78	7655.17	6480.87	6985.75	7175.49
Varianza de la media	255.74	318.55	269.69	219.49	273.40	231.46	249.49	256.27
IC+ (95 %)	5.02	5.11	4.94	4.65	4.73	4.57	5.56	5.08
IC- (95 %)	2.94	2.79	2.81	2.73	2.59	2.60	3.51	3.00
Precisión	0.26	0.29	0.28	0.26	0.29	0.28	0.23	0.26
Inventario Mg ha ⁻¹	79.62	79.02	77.40	73.76	73.21	71.71	90.73	80.80

B_p , B_r , B_b y B_t : biomasa de fuste, ramas, hojas y total, respectivamente, R : valor de la biomasa de referencia, IC+: limite superior del intervalo de confianza al 95 %, IC-: limite inferior del intervalo de confianza. ♦ B_f , B_r , B_b y B_t : bole, branches, leaves and total biomass, each. R : value of the reference biomass. IC+: upper limit of the 95 % confidence interval, IC-: lower limit of the confidence interval.

de lo mencionado en edad de 13 años por Álvarez *et al.* (2005). Además, estas estimaciones de acuerdo con los escenarios propuestos por Seppänen (2002 y 2003), para *E. urophylla*, *E. grandis* y el híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* son bajas, porque a la edad de 7 años se espera tener rendimientos promedio de biomasa aérea de 147.7 Mg ha⁻¹ en esta región, en el escenario menos favorable.

CONCLUSIONES

La correlación alta entre el diámetro normal y la altura total de un árbol con la biomasa aérea permite obtener modelos alométricos para estimar la biomasa total y los componentes estructurales de *Eucalyptus urophylla*. La inclusión de variables adicionales, como altura de fuste limpio y sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas, en los modelos de biomasa de ramas y hojas, mejora estadísticamente los modelos y la precisión de las ecuaciones evaluadas.

La identificación de la relación directa entre el volumen y la biomasa aérea permite aplicar las ecuaciones de biomasa generadas y los sistemas propuestos con datos de un inventario forestal. Las PFC analizadas a la edad del turno definido en siete años tienen en producción promedio de biomasa aérea de 80.89 Mg ha⁻¹.

these estimates, according to the scenarios proposed by Seppänen (2002 and 2003) for *E. urophylla*, *E. grandis* and the *E. grandis* x *E. urophylla* hybrid are low, because at age 7 it is expected to have an average aerial biomass yield of 147.7 Mg ha⁻¹ in this region, in the less favorable scenario.

CONCLUSIONS

The high correlation between the normal diameter and the total height of a tree with the aerial biomass allows obtaining allometric models to estimate the total biomass and the structural components of *E. urophylla*. The inclusion of additional variables, such as clean bole height and summation of the basal diameters of all living branches in the biomass models of branches and leaves, statistically improves the models and the accuracy of the evaluated equations.

The identification of the direct relationship between the volume and the aerial biomass allows applying the generated biomass equations and the proposed systems with forest inventory data. The analyzed CFPs at the age of the defined shift at 7 years have an average aerial biomass production of 80.89 Mg ha⁻¹.

The aerial biomass equations and the obtained expansion factors are reliable for forest inventories use. Thus, they are a tool that facilitates the planning

Las ecuaciones de biomasa aérea y los factores de expansión obtenidos son confiables para utilizarlos en inventarios forestales. Así, son herramienta que facilitan la planeación y ejecución de las actividades de manejo forestal implementadas para *E. urophylla*, y son útiles para evaluar y cuantificar los beneficios adicionales de las plantaciones, como cuantificar el C capturado y acumulado en las plantaciones forestales. Esto es indispensable para negociar bonos de C en los mercados internacionales.

and execution of forest management activities for *E. urophylla*, are useful for evaluating and quantifying the additional benefits of plantations, such as quantifying the captured and accumulated C in forest plantations. This is necessary for trading C bonds in international markets.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Álvarez-González, J. G., M. A. Balboa-Murias, A. Merino, y R. Rodríguez-Soalleiro. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recur. Rurais* 1: 21-30.
- Álvarez-González, J. G., R. Rodríguez-Soalleiro, y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas de ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 23: 35-42.
- Avendaño-Hernández, D. M., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, y J. D. Etchevers-Barra. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Rev. Fitotec. Mex.* 32: 233-238.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method. *Can. J. Forest Res.* 25: 170-173.
- Barrero M. H., W. Toirac A., J. A. Bravo I., A. Vidal C., A. Ajete H., y B. R. Castillo E. 2015. Estimación de la biomasa de ramas secas en plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse de la Provincia Granma, Cuba. *Rev. Cuba. Cienc. For.* 3: 1-12.
- Balzarini, M. G., L. González, M. Tablada, F. Casanoves, J. A. Di Rienzo, y C. W. Robledo. 2008. "INFOSTAT, Manual del Usuario". Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. 336 p.
- Cerruto R. S., C. P. Boechat S., L. Fehrmann, L. A. Gonçalves J., e K. Gadow. 2015. Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in southeast Brazil. *Rev. Árvore, Viçosa-MG* 39: 353-363.
- Chávez-Pascual E. Y., G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Carrillo-Rodríguez, J. R. Enríquez-Del Valle, J. L. Chávez-Servia, y G. V. Campos-Ángeles. 2013. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6: 1273-1284.
- Cutini, A., F. Chianucci, and M. C. Manetti. 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest* 6: 331-337.
- Dauber, E., J. Terán, y R. Guzmán. 2002. Estimación de carbono y biomasa en bosques naturales de Bolivia. *Rev. For. Iberoam.* 1: 1-10.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala, y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Madera Bosques* 13: 25-34.
- Domínguez-Cabrera, G., O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna, y J. A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Chapingo Ser. Cien. For. Amb.* 15: 59-64.
- Eamus, K., Mc. Guinness, and W. Burrows. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. Technical report N° 5. National Carbon accounting system. Greenhouse Pffice, Canberra, Australia. 56 p.
- Ferrere, P., A. M. Lupi, y R. T. Boca. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22: 100-113.
- Ferrere, P., A. M. Lupi, R. T. Boca, V. Nakama, y A. Alfieri. 2008. Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Cien. Flor.* 18: 291-305.
- Fonseca G. W., F. Alice G., y J. M. Rey. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30: 36-47.
- Gaillard B., C., M. Pece, M. Juárez G., y M. Acosta. 2014. Modelaje de la biomasa aérea individual y otras relaciones dendrométricas de *Prosopis nigra* Gris. en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho* 22: 17-29.
- Gárete, M., y J. A. Blanco. 2013. Importancia de la caracterización de la biomasa de raíces en la simulación de ecosistemas forestales. *Ecosistemas* 22: 66-73.
- Geldres E., V. Gerding, y J. E. Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosques* 27: 223-230.
- Garzuglia, M., and M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. *Forest Resources Assessment WP 68*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 30 p.
- Gomes R, A. T. C., N. F. Barros, L. E. Dias, and M. I. Ramos A. 2013. Biomass yield and calorific value of six clonal stands of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake cultivated in northeastern Brazil. *Cerne, Lavras* 19: 467-472.
- Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers-Barra, A. I. Monterroso-Rivas, J. Campo-Alvez y J. A. Tinoco-Rueda. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Rev. Chap. Ser. Cien. For. Amb.* 17: 261-272.
- Gómez-García, E., F. Crecente-Campo, y U. Diéguez-Aranda. 2013. Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noreste de España. *Madera Bosques* 19: 71-91.

- Harvey, A. C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahumamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. For.* 4: 34-45.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1.
- Kauffman, J. B., R. F. Hughes, and C. Heider. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agriculture abandonment in the neotropics. *Ecol. Appl.* 19: 1211-1222.
- Lencinas J. D., y D. Mohr-Bell. 2007. Estimación de clases de edad de plantaciones de la provincial de Corrientes, Argentina, con base a datis satelitales Lansat. *Bosques* 28: 106-118.
- Lim, H., K.-H. Lee, and I. H. Park. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *J. For. Res.* 18: 316-322.
- Loetsch, F., F. Zohrer, and K. E. Haller. 1973. *Forest Inventory*. Munich, DE, BLV Verlagsgesellschaft. 469 p.
- Malhi Y. and J. Grace. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends Ecol. Evol.* 15: 332-336.
- Martínez-González, M. A., A. Sánchez-Villegas y J. Faulín-Fajardo. 2006. *Bioestadística Amigable 2ª Edición*. Editorial Díaz de Santos. Barcelona, España. 919 p.
- Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrete, M. A. Capó-Arteaga, y J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45: 479-491.
- Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. FCCC/INFORMAL/83 - GE.05-61702 (S). <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf> (Consulta: febrero, 2017).
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 257: 427-434.
- Návar, J. 2010. Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: A literature review and the challenges ahead. *In: Maggy Ndombo Benteke Momba* (ed). *Biomass*. Rijeka, Croatia. InTech. pp: 27-64.
- Neter, J., M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and W. Wasserman. 1996. *Applied Linear Statistical Models*. First edition. Mc. Graw-Hill. New York, NY, USA. 1396 p.
- Rodríguez-Ortíz, G., H. M. De Los Santos-Posadas, V. A. González-Hernández, A. Alderete, A. Gómez-Guerrero, y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera Bosques* 18: 25-41.
- Ruiz-Aquino, F., J. I. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortíz, A. Romero-Manzanares, y M. E. Fuentes-López. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera Bosques* 20: 33-48.
- SAS Institute In., 2008. *SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition*. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. S. 238 p. <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug-mcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf> (Consulta: diciembre, 2015).
- Segura, M., y H. J. Andrade. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agrofor. Am.* 46: 89-96.
- Seppänen, P. 2002. Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *For. Ver.* 4: 51-58.
- Seppänen, P. 2003. Costo de la captura de carbono en plantaciones de eucalipto en el trópico. *For. Ver.* 5: 1-6.
- Snowdon, P, J. Raison, H. Keith, K. Montagu, H. Bi, P. Ritson, P. Grieson, M. Adams, W. Burrows, and D. Eamus. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass, National Carbon Accounting System Technical Report, No. 31, First Draft. Australian Greenhouse Office, Au.114 p.
- Solano, D., C. Vega, V. H. Eras, y K. Cueva. 2014. Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. *CEDAMAZ* 4: 32-44.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante, y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- Téllez M., E., M. J. González G., H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., R. J. Lilieholm, y A. Gómez G. 2008. Rotación óptima en plantaciones de eucalipto al incluir ingresos para captura de carbono en Oaxaca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 173-182.
- Vargas-Larreta, B., J. Corral-Rivas, O. Aguirre-Calderón, y J. Nagel. 2010. Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del simulador BWINPro7. *Madera Bosques* 16: 81-104.
- Vásquez, A., y H. Arellano. 2012. Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 923-961.
- Volke H., V. 2008. Estimación de Funciones de Respuesta para Información de Tipo no Experimental, Mediante Regresión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 113 p.