

ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO, MÉXICO

ABOVEGROUND BIOMASS ESTIMATION BY STRUCTURAL COMPONENT IN ZACUALTIPÁN, HIDALGO, MÉXICO

María de los Á. Soriano-Luna¹, Gregorio Ángeles-Pérez^{1*}, Tomás Martínez-Trinidad¹, Francisca O. Plascencia-Escalante¹, Ramón Razo-Zárate²

¹Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo. Estado de México. (gangeles@colpos.mx) ²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias. Avenida Universidad km 1 Exhacienda de Aquetzalpa. Apartado postal 32. 43600 Tulancingo, Hidalgo.

RESUMEN

Las funciones alométricas basadas en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas de la biomasa individual y por unidad de superficie. La estimación de biomasa en los bosques representa un proceso clave para el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de carbono (C) forestal. Modelos de predicción de biomasa se generaron por componente estructural (fuste, ramas, follaje y corteza) para *Pinus patula* y para 11 especies de latifoliadas con importancia ecológica en el bosque mesófilo de montaña en Zacualtipán, Hidalgo, México. Se realizó un muestro destructivo, para seleccionar individuos, que abarcó el intervalo máximo de tamaños; la muestra estuvo formada por 25 árboles de *P. patula* y 46 árboles de 11 especies de latifoliadas. La proporción mayor de la biomasa total en *P. patula* se distribuyó en el fuste (68.2 %), le siguieron las ramas (14.3 %), la corteza (9.3 %) y el follaje (8.2 %). Con el tamaño del árbol de conífera, la partición de la biomasa en el fuste y corteza se incrementó, mientras que la proporción de biomasa del follaje disminuyó. Los modelos de biomasa fueron de la forma $B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$ donde B es la biomasa por árbol (kg), dn es el diámetro normal (cm) y h es la altura total (m). La inclusión de altura del árbol mejoró la capacidad de predicción de los modelos. El ajuste de los componentes estructurales del árbol con ecuaciones simultáneas por regresión no lineal es adecuado, en él la suma de componentes es la biomasa total. Los estimadores estadísticos permiten afirmar que las ecuaciones son apropiadas para usarse con datos de bosques similares al del área de estudio, para estimar los componentes de biomasa de *P. patula* y de especies de latifoliadas analizadas.

ABSTRACT

Allometric functions based on destructive samplings provided precise estimations of individual biomass and per surface unit. Forest biomass estimation represents a key process for sustainable forest management and in the determination of forest carbon stocks (C). Prediction models of biomass were generated by structural component (stem, branches, foliage and bark) for *Pinus patula* and for 11 broadleaved species with ecological importance in the mountain cloud forest of Zacualtipán, Hidalgo, Mexico. A destructive sampling was made to select individuals which included the maximum interval of sizes; the sample was composed of 25 trees of *P. patula* and 46 trees of 11 broadleaved species. The highest proportion of the total biomass in *P. patula* was distributed into the stem (68.2 %), followed by branches (14.3 %), bark (9.3 %) and foliage (8.2 %). With the size of the conifer tree, the allocation of biomass in the stem and bark increased, while the proportion of biomass of the foliage decreased. The biomass models were of the form $B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$ where B is the biomass per tree (kg), dn is the diameter at breast height (cm) and h is total tree height (m). The inclusion of tree height improved the prediction capability of the models. The fit of the structural components of the tree with non-linear regression simultaneous equations is adequate, in which the sum of components is the total biomass. The statistical estimates make it possible to affirm that the equations are appropriate to be used with data of similar forests to that of the study area, to estimate the biomass components of *P. patula* and of broadleaved species analyzed.

Key words: *Pinus patula*, biomass allocation, allometric equations, dry matter, managed forest, mountain cloud forest.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: abril, 2014. Aprobado: abril, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 423-438. 2015.

Palabras clave: *Pinus patula*, distribución de biomasa, ecuaciones alométricas, materia seca, bosque manejado, bosque mesófilo de montaña.

INTRODUCCIÓN

Los bosques son reservorios de C que absorben aproximadamente 30 % de todas las emisiones de CO₂ en un año (Pan *et al.*, 2011) y son de importancia primaria cuando se considera su manejo (Zambrano *et al.*, 2004). Los bosques manejados fijan cantidades altas de CO₂ en función de la edad del rodal, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, y tratamiento silvícola (Acosta *et al.*, 2002; Návar *et al.*, 2005; Avendaño *et al.*, 2009). No obstante, aún se requiere investigación específica al respecto (Avendaño *et al.*, 2009).

La estimación de la biomasa arbórea juega un papel clave en el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de C forestal (Cutini *et al.*, 2013). Los modelos alométricos constituyen un método indirecto práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles (Acosta *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2010). Estas funciones son desarrolladas para una población de árboles mediante la estimación de parámetros de una función que relaciona la biomasa con variables de medición fácil, con técnicas de regresión a través de la cosecha, pesado y registro de la biomasa de una muestra (Somogyi *et al.*, 2006; Návar, 2010; Birdsey *et al.*, 2013).

Los modelos alométricos han sido una herramienta valiosa para predecir la biomasa y el C de especies diversas de árboles (Návar, 2010). Estas relaciones se han generado para estimar la biomasa aérea total de una especie o grupo de especies de bosques templados (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2007; Aguirre y Jiménez, 2011), o la distribución de biomasa y C en los componentes de los árboles (Parresol, 2001; Figueroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2012). En el ajuste de ecuaciones para estimar biomasa y C aéreo, frecuentemente se omite la altura (h) del árbol (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Aguirre y Jiménez, 2011), no obstante que con su inclusión se reduce el error estándar y se mejora el ajuste (Figueroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011; Feldpausch *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012).

En la región de Zacualtipán, Hidalgo, México existen antecedentes de la estimación de biomasa y C

INTRODUCTION

Forests are C reservoirs which absorb approximately 30 % of all of the CO₂ emissions in one year (Pan *et al.*, 2011) and are of primary importance when their management is considered (Zambrano *et al.*, 2004). Managed forests fix high amounts of CO₂ as a function of the stand age, site quality, species composition, density, climatic, soil and topographic conditions, and forest treatment (Acosta *et al.*, 2002; Návar *et al.*, 2005; Avendaño *et al.*, 2009). However, specific research of this topic is still required (Avendaño *et al.*, 2009).

The estimation of tree biomass plays a key role in sustainable forest management and in the determination of stocks of forest C (Cutini *et al.*, 2013). Allometric models comprise a practical indirect method for estimating aboveground tree biomass (Acosta *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2010). These functions are developed for a tree population by means of estimation of a function that relates biomass with easily measured variables, with regression techniques through harvest, weight and recording of the biomass of a sample (Somogyi *et al.*, 2006; Návar, 2010; Birdsey *et al.*, 2013).

Allometric models have been a valuable tool for predicting biomass and C of diverse tree species (Návar, 2010). These relationships have been generated to estimate total aboveground biomass of a species or group of species of temperate forests (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2007; Aguirre and Jiménez, 2011), or the biomass and C allocation in the structural components of the trees (Parresol, 2001; Figueroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2012). In the fitting of equations to estimate aboveground biomass and C, tree height (h) is frequently omitted (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Aguirre and Jiménez, 2011), although with their inclusion the standard error is reduced and the fit is improved (Figueroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011; Feldpausch *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012).

In the region of Zacualtipán, Hidalgo, Mexico, there are antecedents of the estimation of aboveground biomass and C in managed forests of *Pinus patula* (Figueroa *et al.*, 2010; Aguirre *et al.*, 2009). However, one of the principal limitations in the equations used is the overestimation of biomass in trees with diameter at breast height (dbh) greater than 50 cm, due to the fact that for the fit of the

aéreo en bosques manejados de *Pinus patula* (Figueroa *et al.*, 2010; Aguirre *et al.*, 2009). Sin embargo, una de las principales limitantes en las ecuaciones utilizadas es la sobreestimación de la biomasa en árboles con diámetro normal mayor a 50 cm, debido a que para el ajuste de las ecuaciones de biomasa generadas por Figueroa *et al.* (2010) no se consideraron individuos con estas dimensiones. Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue obtener modelos de estimación de biomasa por componente estructural para *P. patula* y 11 especies de latifoliadas a través de la inclusión de árboles de diámetros mayores a 50 cm.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en bosques de *P. patula* en los ejidos La Mojonera y Atopixco, municipio de Zacualtipán, Hidalgo (20° 37' 49.78" N y 98° 37' 51.01" O y 20° 35' 18.74" N y 98° 35' 23" O), México, que abarcan una superficie de 1271.59 ha (Aguirre, *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2013) con suelos tipo Feozem háplico (Hh), ricos en materia orgánica, y en las partes con mayor pendiente Regosol calcárico (Rc) (Santiago *et al.*, 2013). Predomina el clima C(fm) templado húmedo y (Cw2) templado sub-húmedo, con lluvias la mayor parte del año, temperatura media anual entre 12 y 18 °C y precipitación anual de 700 a 2050 mm (Cruz *et al.*, 2010). El área se caracteriza por la presencia de humedad durante la mayor parte del año (Figueroa *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013). El bosque natural corresponde a un bosque mesófilo de montaña (Alcántara y Luna, 2001).

Muestreo de biomasa

Se realizaron muestreos destructivos de 25 árboles de *P. patula* y 46 árboles de latifoliadas, de los cuales 15 correspondieron a *Liquidambar styraciflua*, 14 a *Quercus* spp., 6 a *Alnus jorullensis* y 11 a *Clethra mexicana*, *Prunus serotina*, *Carpinus caroliniana* y *Viburnum ciliatum*. Los árboles seleccionados tenían diámetro normal desde 2.6 a 73 cm en *P. patula* y de 1 a 45 cm en latifoliadas.

El diámetro normal en centímetros se midió en los árboles en pie con ayuda de una cinta diamétrica, y posteriormente fueron derribados. Se midió la altura total (longitud) en m y el fuste fue seccionado en trozas de dimensiones comerciales que variaron entre 1.27 y 2.55 m. La copa de los árboles fue seccionada transversalmente en tres partes iguales y la separación de componentes estructurales, ramas y follaje, se realizó por sección de la copa y por troza en el fuste. La biomasa fresca en el campo de cada

equations of biomass generated by Figueroa *et al.* (2010), individuals with these dimensions were not considered. Therefore, the objective of the present study was to obtain estimation models of biomass by structural component for *P. patula* and 11 broadleaved species through the inclusion of trees with diameters greater than 50 cm.

MATERIALS AND METHODS

Study site

The study was carried out in forests of *P. patula* in the ejidos La Mojonera and Atopixco, municipality of Zacualtipán, Hidalgo (20° 37' 49.78" N and 98° 37' 51.01" W and 20° 35' 18.74" N and 98° 35' 23" W), Mexico, which cover a surface of 1271.59 ha (Aguirre *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2013) with phaeozem haplic soils (Hh) rich in organic matter, and in the areas with steeper slope, calcareous regosol (Rc) (Santiago *et al.*, 2013). The predominant climate is C(fm) humid temperate and (Cw2) sub-humid temperate, with rains most of the year, mean annual temperature between 12 and 18 °C and annual rainfall of 700 to 2050 mm (Cruz *et al.*, 2010). The area is characterized by the presence of moisture during most of the year (Figueroa *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013). The natural forest corresponds to mountain cloud forest (Alcántara and Luna, 2001).

Biomass sampling

Destructive samplings were made of 25 trees of *P. patula* and 46 broadleaved species, of which 15 corresponded to *Liquidambar styraciflua*, 14 to *Quercus* spp., 6 to *Alnus jorullensis* and 11 to *Clethra mexicana*, *Prunus serotina*, *Carpinus caroliniana* and *Viburnum ciliatum*. The selected trees had a diameter at breast height from 2.6 to 73 cm in *P. patula* and 1 to 45 cm in the broadleaved species.

The dbh in centimeters was measured in standing trees with a diametric tape, and the trees were later felled. Total height (length) was measured in m and the stem was sectioned in commercial dimensions which varied from 1.27 to 2.55 m. The crown of the trees was sectioned transversally in three equal parts and the separation of structural components, branches and foliage was made by per section of the crown and per log in the stem. The fresh biomass in the field of each structural component was obtained with a platform scale (Token, 1000 kg capacity and 1 kg precision); additionally, three random samples were obtained per section of the crown for branches and foliage (nine per tree). For the stem, three to four slices of 5 cm thickness per tree were obtained, from which the bark was removed. All of

componente estructural se obtuvo en una báscula con plataforma (Token, capacidad de 1000 kg y precisión de 1 kg); además, se obtuvieron tres muestras de forma aleatoria por sección de la copa para ramas y follaje (nueve por árbol). Para el fuste, se obtuvieron de tres a cuatro rodajas de 5 cm de grosor por árbol, a las que se les separó la corteza. Todas las muestras fueron pesadas en el campo para obtener precisión mayor en la estimación del contenido de humedad, con una báscula electrónica (Labtron C modelo ES 8000 H, capacidad de 8000 g y precisión de 0.1 g). La metodología empleada fue similar a la aplicada por Díaz *et al.* (2007) y Figueroa *et al.* (2010).

Estimación de biomasa por componente estructural y biomasa total

Las muestras se trasladaron al laboratorio para su deshidratación hasta peso constante, en una estufa con aire de circulación forzada (Sheldon modelo 1675-S), a 70 °C y el peso fue registrado con precisión de 0.1 g. Con el peso húmedo y el peso seco de las muestras se determinó el contenido de humedad y el factor de la relación peso seco: peso fresco de la muestra tomada de cada componente (fuste, corteza, ramas, follaje) del árbol. La biomasa de cada componente se estimó multiplicando el peso fresco por el factor peso seco: peso fresco (Díaz *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2013). La biomasa aérea total de cada árbol fue el resultado de la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste, corteza, ramas y follaje) (Cutini *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2013).

Ajuste de modelos

Se probaron modelos lineales y no lineales encontrados en la literatura especializada para relacionar la biomasa total por componente de cada individuo con las dimensiones del árbol (diámetro normal y altura) (Picard, 2012; Lim *et al.*, 2013). El modelo con mejor ajuste, de acuerdo a un análisis numérico (Hernández *et al.*, 2013), fue nuevamente ajustado a través de un sistema de ecuaciones simultáneas para biomasa por componente estructural, para garantizar que la biomasa total aérea fuera la suma de la biomasa de los componentes (Parresol, 1999, 2001; Ruiz *et al.*, 2011). La técnica aplicada para el ajuste fue por regresión conjunta generalizada conocida como SUR (regresiones aparentemente no relacionadas) donde se involucran de forma conjunta todos los errores y permite estimadores consistentes de los componentes de los sistemas no lineales (Parresol, 2001; Cruz *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013). El empleo de esta técnica garantiza la aditividad del sistema donde la biomasa aérea total es la suma de las estimaciones de componentes estructurales de los árboles (Ruiz *et al.*, 2011). El ajuste de los modelos se realizó mediante el procedimiento MODEL en el software SAS (SAS Institute Inc., 2011). Para calificar la bondad de ajuste del

the samples were weighed in the field to obtain greater precision in the estimation of moisture content, using an electronic scale (Labtron C model ES 8000 H, 8000 g capacity and 0.1 g precision). The methodology used was similar to that applied by Díaz *et al.* (2007) and Figueroa *et al.* (2010).

Biomass estimation by structural component and total biomass

The samples were taken to the laboratory for dehydration to constant weight, in a forced air oven (Sheldon model 1675-S), at 70 °C and the weight was registered with a precision of 0.1 g. Moisture content was determined with fresh weight and dry weight of the samples along with the factor of the dry weight: fresh weight ratio of the sample taken of each component (stem, bark, branches, foliage) of the tree. The biomass of each component was estimated by multiplying the fresh weight by the dry weight: fresh weight factor (Díaz *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2013). Total aboveground biomass of each tree was the result of the sum of the biomass of the structural components (stem, bark, branches and foliage) (Cutini *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2013).

Fitting of models

Linear and non-linear models found in the specialized literature were tested to relate total biomass by component of each individual with the tree dimensions (dbh and height) (Picard, 2012; Lim *et al.*, 2013). The model with the best fit, according to a numerical analysis (Hernández *et al.*, 2013) was fitted again by means of a system of simultaneous equations for biomass by structural component, to guarantee that the total aboveground biomass was the sum of the biomass of the components (Parresol, 1999, 2001; Ruiz *et al.*, 2011). The technique applied for the fitting was by joint generalized least squares regression known as SUR (Seemingly Unrelated Regression) where all of the errors are jointly involved and consistent parameter estimates of the components of the non-linear systems are permitted (Parresol, 2001; Cruz *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013). The use of this technique guarantees the additivity of the system where the total aboveground biomass is the sum of the estimations of the structural components of the trees (Ruiz *et al.*, 2011). The fit of the models was made using the MODEL procedure in the SAS software (SAS Institute Inc., 2011). To qualify the goodness of fit of the system, a numerical analysis was made with statistics of frequent use in biometry: adjusted coefficient of determination (R^2) and the root mean squared error (RCME) (Corral *et al.*, 2007).

The models used for the structural components have the form of the scaled combined variable. The scaling permitted the sensitization of the parameters.

sistema se realizó un análisis numérico con estadísticos de uso frecuente en biometría: coeficiente de determinación ajustado (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Corral *et al.*, 2007).

Los modelos utilizados para los componentes estructurales tienen la forma de la variable combinada escalada. El escalamiento permitió la sensibilización de los parámetros.

$$B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$$

donde B es la biomasa por árbol (kg), dn es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m), β_0 y β_1 son los parámetros estimados.

La biomasa total resulta de la suma de la biomasa de los componentes; pero también se ajustó una ecuación para biomasa total, que estará disponible cuando sólo se desea conocer la biomasa total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de la biomasa de árboles individuales de *P. patula*

El diámetro de los árboles muestreados varió de 2.6 a 73 cm. La biomasa total por árbol fue de 1.35 a 4074.6 kg y la edad de los árboles osciló de 3 a 87 años. La proporción de biomasa de los componentes estructurales respecto al total varió en función del tamaño del árbol. A medida que aumentó el diámetro y la altura del árbol, la partición de la biomasa en el fuste y corteza aumentó, en contraste la proporción de biomasa en follaje disminuyó.

La proporción mayor de biomasa en los árboles se concentró en el fuste. Dicha proporción fue de 37 % en árboles con diámetro normal menor a 4 cm (2.6 a 3.56 m de altura); y aumentó con el incremento del diámetro hasta un promedio máximo cercano a 90 % en árboles de 73 cm de diámetro normal. Estos valores son similares a los mínimos y superiores a los máximos obtenidos por Figueroa *et al.* (2010) para la misma especie en la región, con una variación de 36 a 85 % de acuerdo al tamaño del árbol. El segundo componente con proporción mayor de biomasa fueron las ramas (14.3 %; variación de 20 a 9 %), lo siguió la corteza (9.3 %). La biomasa del follaje representó en promedio 8.2 % de la biomasa total (variación de 36 a 1%) y decreció con el tamaño del árbol. En árboles con diámetro menor a 4 cm el follaje constituyó una proporción mayor de la biomasa

$$B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$$

where B is biomass per tree (kg), dn is the diameter at breast height (cm), h is total height (m), β_0 and β_1 are the parameter estimates.

The total biomass results from the sum of the biomass of the components; but an equation was also fitted for total biomass, which will be available when only total biomass is required.

RESULTS AND DISCUSSION

Estimation of biomass of individual trees of *P. patula*

The diameter of the sampled trees varied from 2.6 to 73 cm. Total biomass per tree was 1.35 to 4074.6 kg and the age of the trees fluctuated from 3 to 87 years. The proportion of biomass of the structural components with respect to the total varied as a function of the tree size. As the diameter and height of the tree increased, the allocation of the biomass in the stem and bark increased, while in contrast the proportion of biomass in foliage decreased.

The highest proportion of biomass in the trees was concentrated in the stem. This proportion was 37 % in trees with dbh of less than 4 cm (2.6 to 3.56 m height); and increased with the increment of the diameter to a maximum average of nearly 90 % in trees of 73 cm of dbh. These values are similar to the minimum and higher than the maximum obtained by Figueroa *et al.* (2010) for the same species in the region, with a variation of 36 to 85 % according to the tree size. The second component with highest proportion of biomass was the branches (14.3 %; variation of 20 to 9 %), followed by bark (9.3 %). The biomass of the foliage represented an average of 8.2 % of the total biomass (variation of 36 to 1 %) and decreased with the tree size. In trees with diameter of less than 4 cm, foliage constituted a higher proportion of the biomass (36 %) and decreased inversely with the size and age of the tree to 1 % in trees with more than 50 cm dbh, in which the highest proportion of biomass was in the stem.

The results are similar to those of other studies in conifer species, in which with the increase in dimensions and age of the tree the portions of biomass in the stem and bark increase, and the proportion of biomass in foliage and branches decrease (Lim *et al.*,

(36 %) y disminuyó inversamente con el tamaño y la edad del árbol hasta 1 % en árboles con más de 50 cm de diámetro, en los que la mayor proporción de biomasa estaba en el fuste.

Los resultados son similares a los de otros estudios en especies de coníferas, en las que con el aumento de las dimensiones y la edad del árbol las porciones de biomasa en el fuste y corteza incrementan, y la proporción de biomasa en follaje y ramas disminuyen (Lim *et al.*, 2013). En *P. sylvestris* L. la biomasa de fuste con respecto a la biomasa total aumentó de 66 a 83 % en árboles de más de 100 años (Helmisaari *et al.*, 2002). Peichl y Arain (2007) observaron aumento en la proporción de biomasa en fuste de *P. strobus* L. de 25 % a los 2 años de edad a 69 % a los 65 años, y disminución de la proporción de biomasa en follaje de 34 % a 1.5 % en las edades mencionadas. Este patrón de distribución fue semejante en *P. rigida* Mill en Corea del Sur cuya proporción de biomasa en fuste aumentó de 52 a 69 % y la proporción en follaje disminuyó de 17 a 5 % en edades de 14 a 42 años (Seo *et al.*, 2013).

En el presente estudio las proporciones promedio de biomasa en *P. patula* fueron: fuste (68.2 %), ramas (14.3 %), corteza (9.3 %) y follaje (8.2 %). Estas proporciones son similares a las reportadas previamente para bosques manejados. Díaz *et al.* (2007) cuantificó 82 % en el fuste con corteza, 10 % en las ramas y 8 % en las hojas de árboles de 6.7 a 64.1 cm de diámetro normal. Castellanos *et al.* (1996) encontraron en árboles de 5 a 45 cm de diámetro normal, en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, 72.2 % en el fuste, 16.3 % en la corteza, 8.7 % en las ramas y 2.8 % en el follaje. Rodríguez *et al.* (2012) determinaron en una plantación de *P. patula* de 14 años de edad, 92.9 % en el fuste con corteza, 4.7 % en ramas y 2.4 % en follaje. Las diferencias con el último estudio pueden atribuirse a la edad del arbolado muestreado ya que sólo incluyeron árboles de 14 años de edad. Gayoso (2002) indicó que la proporción de la biomasa en los componentes estructurales de un árbol se modifica en función de la edad, tamaño y patrón de crecimiento. Lo anterior puede atribuirse al cierre de copas, en ese caso los árboles grandes tienen un área foliar relativamente menor que los árboles pequeños debido a las limitaciones impuestas por la luz (Lim *et al.*, 2013).

En árboles de *P. patula* con diámetro normal mayor a 50 cm, la proporción de biomasa en el fuste (con la corteza) fue de 80.6 a 90 %. Este resultado

(2013). In *P. sylvestris* L. the biomass of the stem with respect to total biomass increased from 66 to 83 % in trees of more than 100 years (Helmisaari *et al.*, 2002). Peichl and Arain (2007) observed an increase in the proportion of biomass in stem of *P. strobus* L. of 25 % at 2 years of age to 69 % at 65 years, and decrease of the proportion of biomass in foliage from 34 % to 1.5 % in the above-mentioned ages. This allocation pattern was similar in *P. rigida* Mill in South Korea, whose proportion of biomass in stem increased from 52 to 69 % and the proportion in foliage decreased from 17 to 5 % in ages of 14 to 42 years (Seo *et al.*, 2013).

In the present study the average proportions of biomass in *P. patula* were as follows: stem (68.2 %), branches (14.3 %), cortex (9.3 %) and foliage (8.2 %). These proportions are similar to those previously reported for managed forests. Díaz *et al.* (2007) quantified 82 % in the stem with bark, 10 % in branches and 8 % in the leaves of trees of 6.7 to 64.1 cm of dbh. Castellanos *et al.* (1996) found in trees of 5 to 45 cm of dbh, in the region of Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, 72.2 % in the stem, 16.3 % in the bark, 8.7 % in the branches and 2.8 % in the foliage. Rodríguez *et al.* (2012) determined in a plantation of *P. patula* of 14 years of age, 92.9 % in the stem with bark, 4.7 % in branches and 2.4 % in foliage. The differences with this last study can be attributed to the age of the sampled trees, given that it only included those of 14 years of age. Gayoso (2002) indicated that the proportion of biomass in the structural components of a tree is modified as a function of the age, size and growth pattern. The above can be attributed to crown closure, in this case the large trees have a relatively smaller leaf area than the smaller trees due to the limitations imposed by light availability (Lim *et al.*, 2013).

In trees of *P. patula* with dbh greater than 50 cm, the proportion of biomass in the stem (with bark) was from 80.6 to 90 %. This result is similar (82 % of biomass in the stem) to that reported by Díaz *et al.* (2007), in trees with diameters greater than 50 cm. The proportion of foliage was from 0.8 to 2.7 % (trees > 65 years) and decreased with the increment in tree size. Seo *et al.* (2013) quantified in a conifer, with ages of 40 to 60 years, higher values (5 %) in foliage. In conifers with the increase in the dimensions of the trees, the proportion of stem increases and that of foliage decreases (Helmisaari *et al.*, 2002; Peichl and Arain, 2007). The assignation of biomass to the tree

es semejante (82 % de biomasa en el fuste) al reportado por Díaz *et al.* (2007), en árboles con diámetros superiores a 50 cm. La proporción de follaje fue de 0.8 a 2.7 % (árboles > 65 años) y disminuyó con el incremento del tamaño del árbol. Seo *et al.* (2013) cuantificó en una conífera, con edades de 40 a 60 años, valores superiores (5 %) en el follaje. En coníferas con el aumento de las dimensiones del arbolado la proporción de fuste incrementa y la del follaje disminuye (Helmisaari *et al.*, 2002; Peichl y Arain, 2007). La asignación de biomasa a los componentes del árbol varía a lo largo del ciclo de vida de un bosque (Helmisaari *et al.*, 2002). Por lo tanto, la aplicación de las ecuaciones alométricas, sin considerar la edad o altura del árbol, puede generar sobreestimación o subestimación considerable de la biomasa de cada componente estructural del árbol (Peichl y Arain, 2007) y, en consecuencia, en la biomasa total

Biomasa de árboles individuales en latifoliadas

El diámetro de los árboles muestreados varió de 1 a 45 cm. La biomasa total por árbol varió de 0.2 a 1449.9 kg. La mayor proporción de biomasa en los árboles de latifoliadas se concentró en el fuste, con 49.1 %, aunque este porcentaje fue menor al de *P. patula*, que destina mucha más biomasa al fuste. En contraste las latifoliadas asignaron proporción mayor de biomasa (38 %) que *P. patula* (14.3 %) a las ramas, pero menos al follaje que la conífera (4.1 % y 8.2 %); aunque en este caso la proporción de hojas entre las especies no difirió grandemente, se han observado diferencias entre especies y dentro de la misma especie (Wang, 2006). En corteza las latifoliadas destinaron proporción menor de biomasa en comparación con *P. patula* (8 % y 9.3 %)

Los resultados concuerdan con los de otros autores, que han señalado que la mayor proporción de biomasa en latifoliadas se concentra en el fuste. Gayoso (2002) detectó 61.9 a 88.1 % en el fuste, 6.1 a 22.2 % en ramas, 4.6 a 16.2 % en corteza y 0.6 a 5.0 % en hojas de especies nativas de Chile. Monroy y Návar (2004) determinaron que en *Hevea brasiliensis* la biomasa del fuste y ramas representa 73.8 % y 27.1 %, y Gómez *et al.* (2011) reportaron proporciones promedio de los componentes de *Quercus magnoliaefolia* de 62.5, 27.8 y 9.6 % en el fuste, las ramas y el follaje. Así, es posible señalar que la variabilidad en la distribución de biomasa entre los componentes del árbol es indudable. Al respecto, Montero *et al.*

components varies throughout the life cycle of a forest (Helmisaari *et al.*, 2002). Therefore, the application of the allometric equations, without considering the age or height of the tree, can generate considerable overestimation or underestimation of the biomass of each structural component of the tree (Peichl and Arain, 2007), and consequently, of the total biomass.

Biomass of individual trees in broadleaved species

The diameter of the sampled trees varied from 1 to 45 cm. Total biomass per tree varied from 0.2 to 1449.9 kg. The highest proportion of biomass in broadleaved trees was concentrated in the stem, with 49.1 %, although this percentage was lower than that of *P. patula*, which destines much more biomass to the stem. In contrast, the broadleaved species assigned a higher proportion of biomass (38 %) than *P. patula* (14.3 %) to branches, but less to foliage than the conifer (4.1 % and 8.2 %); although in this case the proportion of leaves among the species did not differ greatly, differences have been observed among species and within the same species (Wang, 2006). In bark, the broadleaved species destined a lower proportion of biomass with respect to *P. patula* (8 % and 9.3 %).

The results coincide with those of other authors, who have pointed out that the highest proportion of biomass in broadleaved species is concentrated in the stem. Gayoso (2002) detected 61.9 to 88.1 % in the stem, 6.1 % to 22.2 % in branches, 4.6 to 16.2 % in bark and 0.6 to 5.0 % in leaves of native species of Chile. Monroy and Návar (2004) determined that in *Hevea brasiliensis*, biomass of stem and branches represents 73.8 % and 27.1 %, and Gómez *et al.* (2011) reported average proportions of the components of *Quercus magnoliaefolia* of 62.5, 27.8, and 9.6 % in the stem, branches and foliage. Thus, it is possible to point out that the variability in the distribution of biomass among the components of the tree is unquestionable. To this respect, Montero *et al.* (2005) reported for *Alnus glutinosa* L. distribution of 75.9, 21.4 and 2.7 % in stem, branches and foliage, and in *Quercus ilex* L., 28.1 % in stem, 68.9 % in branches and 3 % in leaves.

Biomass equations by structural component

The models for estimating biomass by structural component that showed the best fit were those that

(2005) reportó para *Alnus glutinosa* L. distribución de 75.9, 21.4 y 2.7% en el fuste, las ramas y el follaje, y en *Quercus ilex* L. la partición fue 28.1% en fuste, 68.9 % en ramas y 3 % en hojas.

Ecuaciones de biomasa por componente estructural

Los modelos para estimar biomasa por componente estructural que mostraron mejor ajuste fueron los que incluyeron la altura del árbol en la ecuación, ya que presentaron coeficiente de determinación ajustado (R²) alto y raíz del cuadrado medio del error (RMSE) menor (Cuadro 1). Los resultados concuerdan con los de trabajos previos (Figuroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011). El ajuste de las ecuaciones simultáneas, mediante la técnica SUR (regresiones aparentemente no relacionadas), generó estimadores adecuados y propició mejor ajuste al considerar la variabilidad total de los cuatro componentes estructurales del árbol.

Los datos de cada componente estructural observados se ajustaron bien a los modelos (Figura 1 y 2). Las ecuaciones presentaron heterocedasticidad, que es un problema común con ajuste simultáneo (Álvarez *et al.*, 2007). Los modelos se analizaron con corrección de la propiedad por ponderación (Harvey, 1976; Neter *et al.*, 1996; Álvarez *et al.*, 2007); se concluyó que los modelos sin ponderación son más adecuados, por presentar mejor bondad de ajuste con base en un análisis numérico y criterios de apalancamiento, y prueba de hipótesis (Burkhart y Tomé, 2012; Hernández *et al.*, 2013).

Con la inclusión de la altura del árbol, la información sobre el entorno competitivo (edad del rodal, índice de sitio, densidad) se considera indirectamente en el modelo (Wirth *et al.*, 2004). Este hecho hace que el modelo específico para el sitio de estudio sea más general y permite el uso de la ecuación para otros sitios con condiciones similares (Ketterings *et al.*, 2001).

Otras variables independientes, como la longitud de la copa, han sido probadas en estudios de estimación de biomasa (Carvalho y Parresol, 2003; Antonio *et al.*, 2007); pero, con el fin de asegurar la aplicabilidad de los modelos, no se ha considerado esta variable, ya que generalmente no se mide en los inventarios forestales (Ruiz *et al.*, 2011).

Un aspecto importante, al estimar la biomasa mediante muestreos destructivos y generar ecuaciones, es

incluido tree height in the equation, given that they presented a high adjusted coefficient of determination (R²) and a lower root mean squared error (RMSE) (Table 1). The results concur with those of previous reports (Figuroa *et al.*, 2010; Ruiz *et al.*, 2011). The fit of the simultaneous equations using the SUR technique (Seemingly Unrelated Regressions) generated adequate estimators and provided better fit by considering the total variability of the four structural components of the tree.

The data of each structural component observed fitted well to the models (Figure 1 and 2). The equations presented heterocedasticity, which is a common problem with simultaneous fit (Álvarez *et al.*, 2007). The models were analyzed with correction of the property by weighting (Harvey, 1976; Neter *et al.*, 1996; Álvarez *et al.*, 2007). It was concluded that the unweighted models are more adequate, because they present better goodness of fit based on a numerical analysis and criteria of leverage, and hypothesis test (Burkhart and Tomé, 2012; Hernández *et al.*, 2013).

With the inclusion of tree height, the information of the competitive surroundings (stand age, site index, tree density) is indirectly considered in the model (Wirth *et al.*, 2004). This fact makes the specific model for the study site more general and permits the use of the equation for other sites with similar conditions (Ketterings *et al.*, 2001).

Other independent variables, such as crown length, have been tested in studies of biomass estimation (Carvalho and Parresol, 2003; Antonio *et al.*, 2007). However, for the purpose of insuring the applicability of the models, this variable has not been considered, given that it is generally not measured in forest inventories (Ruiz *et al.*, 2011).

An important part in estimating biomass through destructive samplings and generating equations is to know their allocation in the different structural components (Ruiz *et al.*, 2011). Knowing the biomass allocation of the tree in the components makes it possible to know the destination of the derived products, and to follow the carbon from its extraction from the mountain to when it is released once more into the atmosphere (Montero *et al.*, 2005). Similarly, it provides relevant information to parameterize simulation models and carbon accounting (Kurz *et al.*, 2009).

The generated models make it possible to observe the variation of the proportion with respect to tree

Cuadro 1. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa por componente estructural y total de árboles individuales de *Pinus patula* y latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo, México.
 Table 1. Parameters and regression estimates of biomass equations fitted by structural component and total of individual trees of *Pinus patula* and broadleaved species in Zacualtipán, Hidalgo, México.

Componente	Parámetro	Pinus patula					Latifoliadas				
		Estimador	Error estándar	PR > T	Raíz MSE	R2 ajustada	Estimador	Error estándar	PR > T	Raíz MSE	R2 ajustada
Follaje	β_0	4.750974	2.5470	0.0755	9.7013	0.6337	2.437957	0.7368	0.0019	6.8093	0.757
	β_1	0.709796	0.2213	0.0041			0.574860	0.0741	<0.0001		
Ramas	β_0	5.510841	2.0433	0.0132	67.8365	0.735	6.663739	1.7575	0.0005	73.2064	0.7413
	β_1	0.951067	0.1752	<0.0001			1.208846	0.1703	<0.0001		
Fuste	β_0	4.682959	1.0194	0.0001	189.6000	0.9298	4.196867	0.4986	<0.0001	29.4694	0.9637
	β_1	1.033543	0.0871	<0.0001			0.988965	0.0487	<0.0001		
Corteza	β_0	7.441298	1.5822	0.0001	39.1507	0.8701	5.630984	1.5461	0.0007	14.6391	0.7236
	β_1	1.103791	0.1349	<0.0001			0.949278	0.1512	<0.0001		
Biomasa total [†]					272.2000	0.9182				0.8934	0.8858
Biomasa total [‡]		4.554805	1.0650	0.0003	260.0000	0.9254	3.109407	0.8883	0.0011	107.2000	0.8938
		1.047218	0.0910	<0.0001			0.952688	0.0869	<0.0001		

[†] Biomasa total estimada como la suma de las estimaciones de biomasa por componente. [‡] Total biomass estimated as the sum of the estimations of biomass by component. [§] Biomasa total estimada a partir de la biomasa total observada. [¶] Total biomass estimated from the total biomass observed.

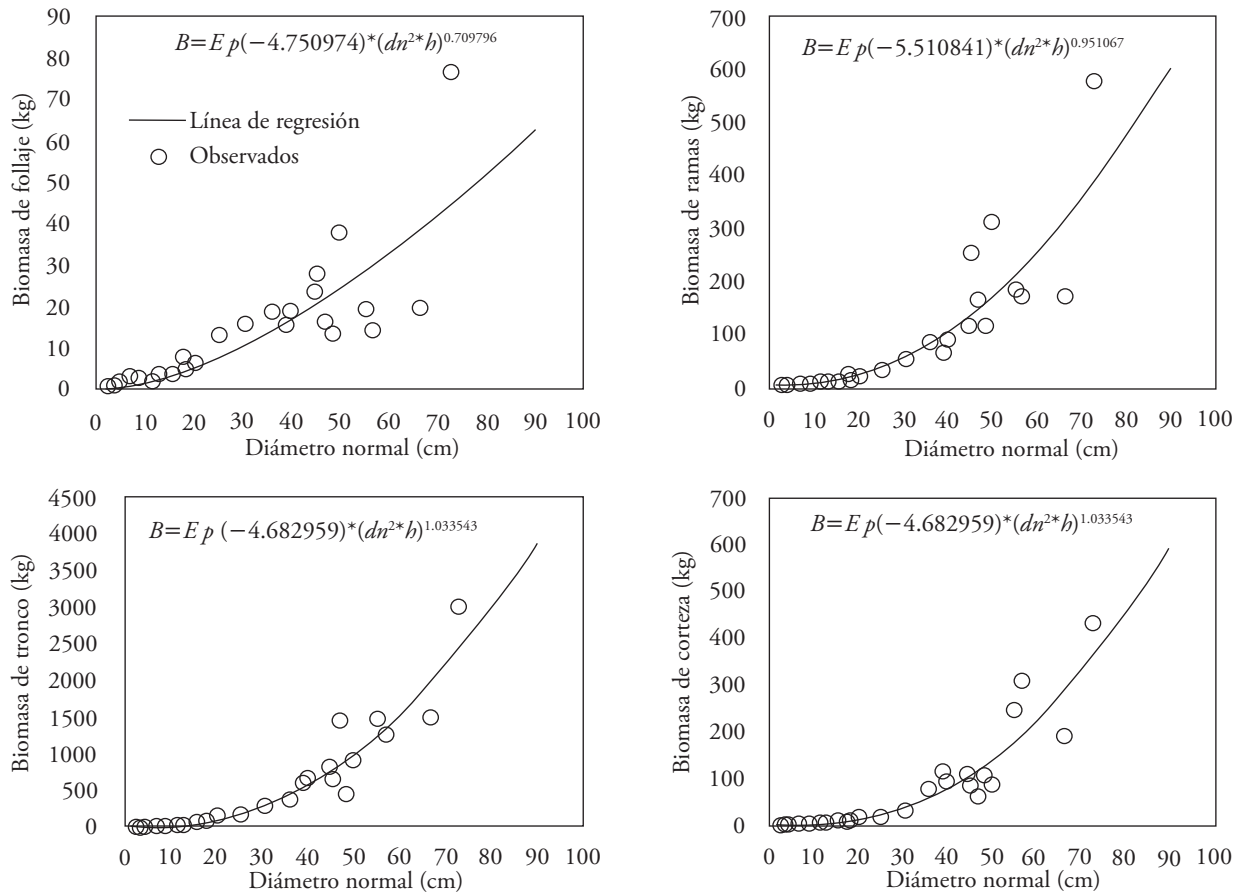


Figura 1. Relación de biomasa de componentes estructurales en árboles de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, México.
Figure 1. Relationship of biomass of structural components in trees of *Pinus patula* in Zacualtipán, Hidalgo, México.

conocer su distribución en los componentes estructurales diferentes (Ruiz *et al.*, 2011). Conocer la distribución de la biomasa del árbol en los componentes permite conocer el destino de los productos derivados, y puede hacerse el seguimiento del carbono desde que se extrae del monte hasta que es liberado a la atmósfera nuevamente (Montero *et al.*, 2005); asimismo, provee información relevante para parametrizar modelos de simulación y contabilidad de carbono (Kurz *et al.*, 2009).

Los modelos generados permiten observar la variación de la proporción respecto al tamaño del árbol. En *P. patula* se observó incremento en la proporción del fuste y la corteza y disminución en la del follaje. En las especies de latifoliadas se observó incremento en la proporción de biomasa en las ramas y en la corteza con el aumento del diámetro del arbolado (Figura 3).

size. In *P. patula* an increment was observed in the proportion of the stem and bark a decrease in that of foliage. In the broadleaved species, an increment was observed in the proportion of biomass in the branches and in bark with the increase in diameter of the trees (Figure 3).

The non-linear model used was applied by Ruiz *et al.* (2011) in some structural components of various conifer species, obtaining good relationships. Other authors also have applied non-linear models, and even with coefficients of determination <0.50 have emphasized the importance of these models by reflecting the behavior with the increment of the dimensions and age of the tree (Peichl and Arain, 2007; Petrokofsky *et al.*, 2012; Lim *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2013).

Height and diameter are the most common dependent variables for the evaluation of tree

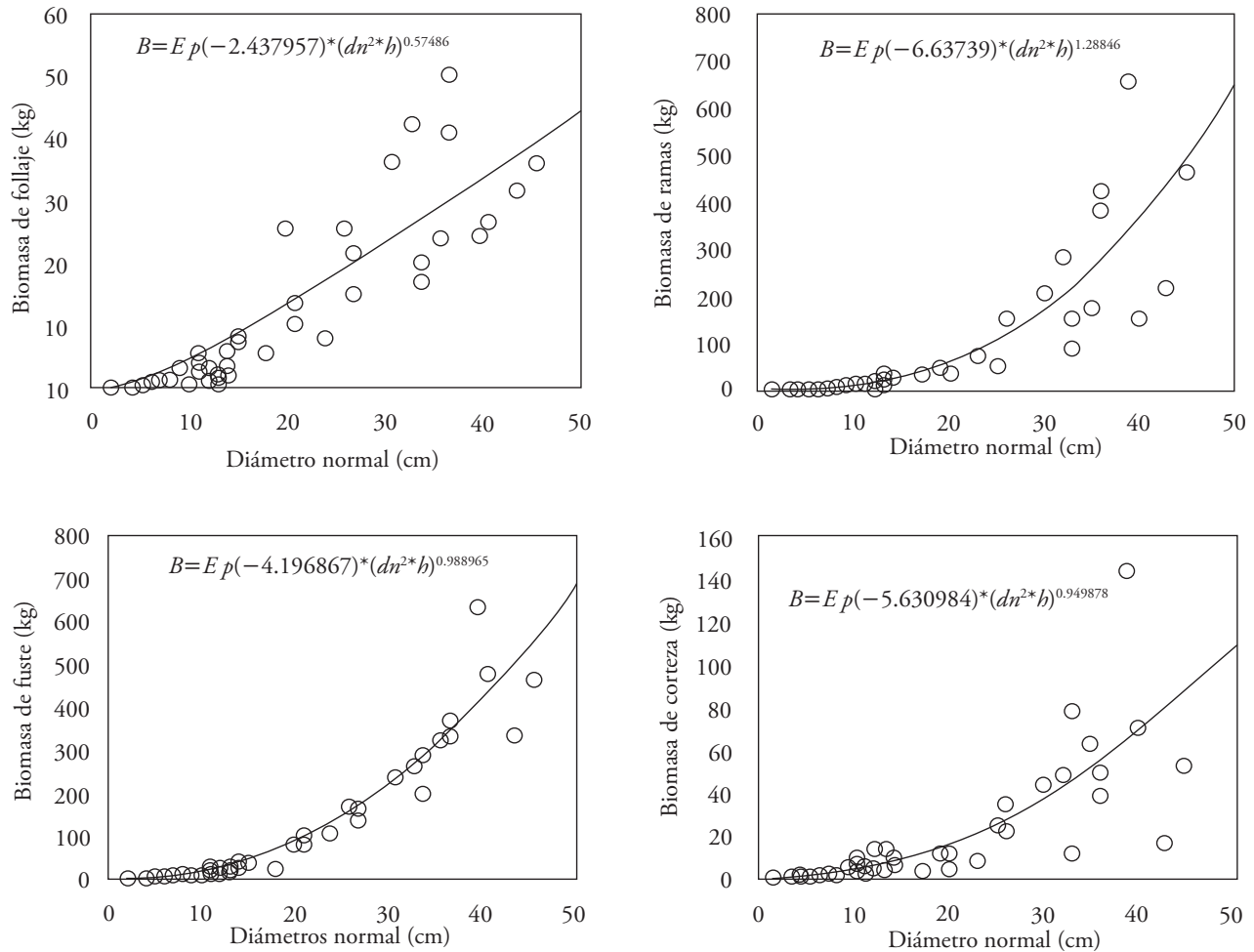


Figura 2. Relación de biomasa por componente estructural en árboles de especies latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo, México.
Figure 2. Relationship of biomass by structural component in trees of broadleaved species in Zacualtipán, Hidalgo, México.

El modelo no lineal utilizado fue aplicado por Ruiz *et al.* (2011) en algunos componentes estructurales de varias especies de coníferas, con él se obtuvieron buenas relaciones. Otros autores también han aplicado modelos no lineales, y aun con coeficientes de determinación <0.50 han resaltado la importancia de estos modelos al permitir reflejar el comportamiento con el incremento de las dimensiones y edad del árbol (Peichl y Arain 2007; Petrokofsky *et al.*, 2012; Lim *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2013).

La altura y el diámetro son las variables dependientes más comunes para la evaluación de la biomasa de los árboles, pero la dificultad de la medición de la altura en árboles individuales ha propiciado que la mayoría de los modelos alométricos se basen

biomass, but the difficulty of measurement of height in individual trees has been the reason that most of the allometric models are based principally on diameter (Williams and Schreuder, 2000). Although there are cases in which height is the key independent variable for explaining the variations in biomass (such as in palm trees) (Petrokofsky *et al.*, 2012), the inclusion of height in the models reduces the standard error and improves their fit (Feldpausch *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012).

The generated models are conservative with respect to the observed data, while the models of Figueroa *et al.* (2010) overestimate biomass in all of the sampled trees, which is greater in trees with dbh of less than 18 cm. In trees with dbh greater

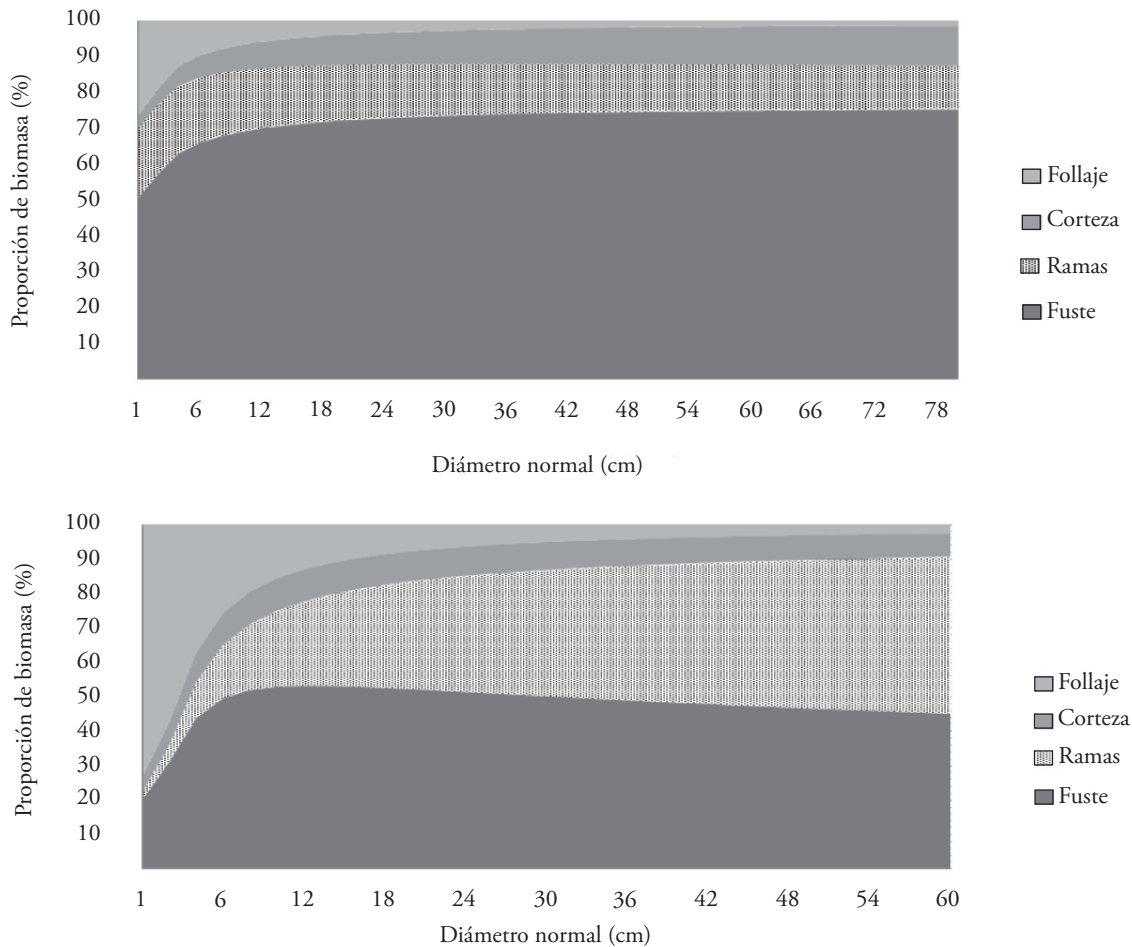


Figura 3. Proporción de biomasa por componente estructural en árboles de a) *Pinus patula* y b) especies latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo, México.

Figure 3. Proportion of biomass by structural component in trees of a) *Pinus patula* and b) broadleaved species in Zacualtipán, Hidalgo, México.

principalmente en el diámetro del árbol (Williams y Schreuder, 2000). Aunque hay casos en los que la altura es la variable independiente clave para explicar las variaciones en la biomasa (como en las palmas) (Petrokofsky *et al.*, 2012), la inclusión de la altura en los modelos reduce el error estándar y mejora su ajuste (Feldpausch *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012).

Los modelos generados son conservadores respecto de los datos observados, mientras que los modelos de Figueroa *et al.* (2010) sobreestiman la biomasa en todo el arbolado muestreado, la cual es mayor en árboles con diámetros menores a 18 cm de diámetro normal. En arbolado con diámetro normal mayor de

than 50 cm, the equation of Figueroa *et al.* (2010) in most cases overestimates the observed biomass, which is attributed to the fact that trees larger than these dimensions are not included for the fit of the equations (Table 2).

As a consequence of considering a simultaneous fit, the additivity and use of tree height as a predictive variable, the biomass equations for *P. patula* presented in this study are better than those proposed by Figueroa *et al.* (2010); given that they are additive, which is a desirable property in fitting by components (Parresol, 1999 and 2001). Furthermore, they generate a variable proportion of biomass by component as a

50 cm la ecuación de Figueroa *et al.* (2010) en la mayoría de los casos sobreestima la biomasa observada, lo cual se atribuye a que no se incluyen los árboles mayores a esa dimensión para el ajuste de las ecuaciones (Cuadro 2).

Como consecuencia de considerar un ajuste simultáneo, la aditividad y el uso de la altura de los árboles como una variable predictora, las ecuaciones de biomasa para *P. patula* presentadas en este estudio son mejores que las propuestas por Figueroa *et al.* (2010); ya que son aditivas, esta es una propiedad deseable en el ajuste por componentes (Parresol, 1999 y 2001); además generan una proporción de biomasa por componente estructural variable en función del tamaño del arbolado mientras, que los modelos de Figueroa *et al.* (2010) no garantizan aditividad y la proporción de biomasa por componente es constante, aun cuando las dimensiones del arbolado aumenten.

function of tree size, whereas the models of Figueroa *et al.* (2010) do not guarantee additivity and the proportion of biomass by component is constant, even when the tree dimensions increase. On the other hand, the equations of broadleaved species can be improved if the sample is increased and if models per species are considered. The inclusion of tree height in the biomass equations as an additional predictive variable could improve the precision of the biomass estimations by developing equations with combined variables of dbh height, and consequently, the estimations of carbon stored in the ecosystems (Peichl and Arain, 2007).

CONCLUSIONS

The inclusion of trees with diameter greater than 50 cm and the simultaneous fit, considering the

Cuadro 2. Biomasa total de *Pinus patula* observada y estimada a partir del sistema de ecuaciones por componente estructural con la ecuación de Figueroa *et al.* (2010).

Table 2. Total biomass of *Pinus patula* observed and estimated from the system of equations by structural component and with the equation of Figueroa *et al.* (2010).

Diámetro normal (cm)	Altura (m)	Biomasa total		
		Observada (kg)	Sistema de ecuaciones generado (kg)	Ecuación Figueroa <i>et al.</i> 2010
2.61	2.60	1.35	1.12	5.67
3.80	3.56	3.11	2.41	6.30
5.00	4.14	5.64	4.12	7.27
7.10	5.64	11.76	9.28	10.64
9.30	7.51	14.21	18.55	17.44
11.70	12.85	37.65	43.97	38.12
13.20	13.61	39.76	57.21	49.53
15.80	17.10	81.57	96.58	84.89
17.83	16.33	118.81	115.12	102.08
18.60	18.59	101.13	139.62	125.19
20.50	20.91	192.83	185.19	169.09
25.40	19.44	227.38	255.93	239.06
30.80	20.71	364.51	385.76	371.45
36.20	21.50	540.03	537.22	530.37
39.30	32.20	794.15	907.70	932.10
40.10	30.40	864.55	893.35	916.28
45.00	31.90	1048.46	1156.59	1209.11
45.50	22.60	1010.25	857.85	877.23
47.20	30.80	1663.48	1223.23	1284.02
48.60	22.15	672.23	951.29	980.27
50.00	26.60	1352.26	1188.16	1244.57
55.40	33.50	1900.62	1781.47	1921.33
56.90	31.10	1739.29	1747.13	1881.69
66.70	33.70	1849.82	2532.33	2799.24
73.00	35.00	4074.61	3105.48	3481.05

Por su parte, las ecuaciones de especies latifoliadas pueden ser mejoradas si se incrementa la muestra y se consideran modelos por especie. La inclusión de la altura del árbol en las ecuaciones de biomasa como una variable predictora adicional, podría mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa al desarrollar ecuaciones con variables combinadas de diámetro normal-hora y, en consecuencia, las estimaciones de carbono almacenado en los ecosistemas (Peichl y Arain, 2007).

CONCLUSIONES

La inclusión de arbolado con diámetro mayor a 50 cm y el ajuste simultáneo, considerando la aditividad de las ecuaciones, mejoró la estimación de la biomasa de árboles individuales. Las funciones ajustadas para la estimación de biomasa por componente estructural y total en *P. patula* y latifoliadas a través de mediciones de diámetro normal y altura de los árboles generaron coeficientes cuyos estimadores estadísticos permiten afirmar que las ecuaciones determinadas son adecuadas y confiables para usarse en condiciones similares y para estimar los valores de biomasa para *P. patula* y latifoliadas estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE.UU. a través del Northern Research Station y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE. UU.

LITERATURA CITADA

- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M., y J. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Aguirre C., O. A., y J. Jiménez P. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Mex. Cien. For.* 2: 73-84.
- Aguirre S., C. A., J. R. Valdez L., G. Ángeles P., H. M. de los Santos P., R. Haapanen, y A. I. Aguirre S. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosque de *Pino patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220.
- Alcántara A., O., e I. Luna V. 2001. Análisis florístico de dos áreas con bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, México: Eloxochitlán y Tlahuelompa. *Acta Bot. Mex.* 54: 51-87.
- Álvarez G., J. G., R. Rodríguez S. y A. Rojo A. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones:

additivity of the equations, improved the estimation of the biomass of individual trees. The functions fitted for the estimation of biomass by structural and total components in *P. patula* and broadleaved species using measurements of dbh and tree height generated coefficients whose statistical estimators make it possible to affirm that the determined equations are adequate and reliable to be used under similar conditions and to estimate the values of biomass for *P. patula* and broadleaf species studied.

—End of the English version—

-----*-----

- heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 23: 35-42.
- Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares, and L. Fontes. 2007. Effect of the tree, stand and site variables of the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Can. J. For. Res.* 37: 895-906.
- Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A., y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de Biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Rev. Fitotec. Mex.* 32: 233-238.
- Birdsey, R., G. Angeles P., W. A. Kurz, A. Lister, M. Olguin, Y. Pan, C. Wayson, B. Wilson, and K. Johnson. 2013. Approaches to Monitoring Changes in Carbon Stocks for REDD+. *Carbon Management* 4: 519-537.
- Burkhardt, H. E. and M. Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer. New York, USA. 457 p.
- Carvalho, J.P., and B.R. Parresol. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *For. Ecol. Manag.* 179: 269-276.
- Castellanos B., J. F., A. Velázquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F., y A. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Corral R., J. J., M. Bario A., A. O. Aguirre C., and U. Diéguez A. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (México). *Forestry* 80: 29-40.
- Cruz C., F., H. M. De los Santos P. y J. R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Cruz L., I. A., J. R. Valdez L., G. Ángeles P., y H. M. de los Santos P. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosque* 16: 75-97.
- 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.
- Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A., y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13: 25-34.

- Feldpausch, T. R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo M., G. Lopez G., L. Banin, K. Abu Salim, K. Affum-Baffoe, M. Alexiades, S. Almeida, I. Amaral, A. Andrade, L. E. O. C. Aragão, A. Araujo M., E. J. M. M. Arets, L. Arroyo, G. A. Aymard C., T. R. Baker, O. S. Bánki, N. J. Berry, N. Cardozo, J. Chave, J. A. Comiskey, E. Alvarez, A. de Oliveira, A. Di Fiore, G. Djagbletey, T. F. Domingues, T. L. Erwin, P. M. Fearnside, M. B. França, M. A. Freitas, N. Higuchi, E. Honorio C., Y. Iida, E. Jiménez, A. R. Kassim, T. J. Killeen, W. F. Laurance, J. C. Lovett, Y. Malhi, B. S. Marimon, B. H. Marimon-Junior, E. Lenza, A. R. Marshall, C. Mendoza, D. J. Metcalfe, E. T. A. Mitchard, D. A. Neill, B. W. Nelson, R. Nilus, E. M. Nogueira, A. Parada, K. S.-H. Peh, A. Pena C., M. C. Peñuela, N. C. A. Pitman, A. Prieto, C. A. Quesada, F. Ramírez, H. Ramírez A., J. M. Reitsma, A. Rudas, G. Saiz, R. P. Salomão, M. Schwarz, N. Silva, J. E. Silva E., M. Silveira, B. Sonké, J. Stropp, H. E. Taedoum, S. Tan, H. ter Steege, J. Terborgh, M. Torello R., G. M. F. van der Heijden, R. Vásquez, E. Vilanova, V. A. Vos, L. White, S. Willcock, H. Woell, and O. L. Phillips. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences* 9: 3381–3403.
- Figueroa N., C. F., G. Angeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 1: 105-112.
- Gayoso, J. 2002. Medición de la captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. *Rev. For. Iber.* 1: 1-13.
- Gómez D., J. D., J. D. Etchevers B., A. I. Monterroso R., J. Campo A., and J. A. Tinoco R. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 261-272.
- Harvey, A. C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Helmisaari, H.-S., K. Makkonen, S. Kellomaki, E. González Valtonen, and E. Malkonen. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in *Scots pine* stands in eastern Finland. *For. Ecol. Manag.* 165: 317–326.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y V. H. Volke H. 2013. Funciones de abusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtípán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 4: 34-45.
- Ketterings, Q. M., R. Coe, V. Van Noordwijk, Y. Ambagau, and C. A. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *For. Ecol. Manag.* 146: 199-209.
- Kurz, W. A., C. C. Dymond, T. M. White, G. Stinson, C. H. Shaw, G. J. Rampley, C. Smyth, B. N. Simpson, E. T. Neilson, J. A. Trofymow, J. Metsaranta and M. J. Apps. 2009. CBM-CF3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220: 480-504.
- Lim, H., K.-H. Lee, 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.
- Litton, C. M., M. G. Ryan, D. B. Tinker, and D. H. Knight. 2003. Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Can. J. For. Res.* 33: 351–363.
- Magnani F., M. Mencuccini, and J. Grace. 2000. Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant Cell Environ.* 23: 251–263.
- Monroy R., C., y J. J. Nívar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.
- Montero, G., R. Ruiz-Peinado, y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid. 270 p.
- Nívar C., J. J., N. González, y J. Graciano. 2005. Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 11:15-34.
- Nívar, J. 2010. Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. In *Biomass*. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. pp. 27-64.
- Neter, J.; M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and W. Wasserman, 1996. *Applied linear statistical models*. 4th edition. McGraw-Hill. New York.
- Pacheco E., F. C., A. Aldrete, A. Gómez G., A. M. Fierros G., V. M. Cetina-Alcalá, y H. Vaquera H., .2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 251-254.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45: 573-593.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.* 31: 865-878.
- Peichl M., and M.A. Arain. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *For. Ecol. Manag.* 253: 68–80.
- Petrokofsky, G., H. Kanamaru, F. Achar, S. J. Goetz, H. Joosten, P. Holmgren, A. Lehtonen, M. C. S. Menton, A. S. Pullin, and M. Wattenbach. 2012. Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environ. Evid.* 1: 1-21.
- Picard, N., L. Saint-André, y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier. 223 p.
- Rodríguez O., G., H. M. de los Santos P., V. A. González, H. A. Aldrete, A. Gómez G. y A. M. Fierros G. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18: 25-41.

- Ruiz P., R., M. del Rio, y G. Montero. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of the Spanish softwood species. *Forest Systems* 20: 176-188.
- Santiago G., W., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y G. Ramírez V. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 163-172.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3. User's Guide. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- Schlegel, B., J. Gayoso, y J. Guerra. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos Muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral De Chile. Valdivia, Chile. 24 p.
- Seo, Y. O., Y. J. Lee, R. I. C. Lumbres, J. K. Pyo, R. H. Kim, Y. M. Son, and K. H. Lee. 2013. Influence of stand age class on biomass expansion factor and allometric equations for *Pinus rigida* plantations in South Korea. *Scand. J. For. Res.* 28: 566-573.
- Somogyi, Z., E. Cienciala, R. Mäkipää, P. Muukkonen, A. Lehtonen, and P. Weiss. 2006. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur. J. For. Res.* 126: 197-207.
- Tateno, R., T. Hishi, and H. Takeda. 2004. Above- and below-ground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *For. Ecol. Manag.* 193: 297-306.
- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *For. Ecol. Manag.* 222: 9-16.
- Wirth, C., J. Schumacher, and E.D. Schulze. 2004. Generic biomass functions for *Norway spruce* in Central Europe a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.* 24: 121-139.
- Williams, M. S., and H. T. Schreuder. 2000. Guidelines for choosing volume equations in the presence of measurement error in height. *Can. J. For. Res.* 30: 306-310.
- Zambrano, A., F. Franquis, y A. Infante. 2004. Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. *Rev. For. Lat.* 35: 11-20.