



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.311>

Artículo

Factores de expansión y sistema de partición de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen

Expansion factors and system partition of aerial biomass for *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen

Luis Martínez Angel¹, Héctor Manuel De los Santos Posadas^{2*}, Aurelio Manuel Fierros González², Reynol Fierros Mateo², Ramiro Pérez Miranda¹, Adrián Hernández Ramos³ y Jonathan Hernández Ramos⁴

Abstract:

In the present study, expansion factors for constant and variable biomass were developed, as well as an aerial biomass partition system in commercial forest plantations of *Pinus chiapensis*. By means of a destructive sampling of 35 trees, the fresh weight of stems, branches and foliage in the field was obtained and samples were taken to determine their dry weight. The ratio of the dry and fresh weight was used to convert the green weight into biomass. The aerial biomass was estimated from a direct proportion of the total volume of the stem multiplied by a constant biomass expansion factor. The variable biomass expansion factor was determined based on the quotient of the total aerial biomass model and the total volume of the stem. The aerial biomass partition system was fitted as a direct function of the biomass and a partition factor, which defines the proportion of the biomass by components. The value of the constant biomass expansion factor revealed that for each cubic meter there are 709 kg of biomass. The system of aerial biomass partition indicated a greater biomass distribution in the stem with 69 %, of branches with 21 % and of foliage with 10 %. The application of the biomass expansion factors and the aerial biomass partition system allow us to calculate the total aerial biomass and by components from the total stem volume of the trees measured in the forest inventories.

Keys words: Forest biomass, structural components, allometric equations, *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, forest plantations, total stem volume.

Resumen:

En el presente estudio se desarrollaron factores de expansión para biomasa constante y variable, además de un sistema de partición de biomasa aérea en plantaciones forestales comerciales de *Pinus chiapensis*. Mediante un muestreo destructivo de 35 árboles, se obtuvo el peso fresco de fuste, ramas y follaje en el campo y se tomaron muestras para determinar su peso seco. La relación del peso seco y fresco se empleó para convertir el peso fresco en biomasa. A partir de una proporción directa del volumen total del fuste multiplicada por un factor de expansión de biomasa constante se estimó la biomasa aérea. El factor de expansión de biomasa variable se determinó con base en el cociente del modelo de biomasa aérea total y del volumen total del fuste. El sistema de partición de biomasa aérea se ajustó como una función directa de la biomasa y un factor de partición, que define la proporción de la biomasa por componentes. El valor del factor de expansión de biomasa constante reveló que por cada metro cúbico existen 709 kg de biomasa. El sistema de partición de biomasa aérea indicó una distribución de biomasa mayor en el fuste con 69 %, de ramas con 21 % y de follaje con 10 %. La aplicación de los factores de expansión de biomasa y sistema de partición de biomasa aérea permiten calcular la biomasa aérea total y por componentes a partir del volumen total del fuste de los árboles medidos en los inventarios forestales.

Palabras clave: Biomasa forestal, componentes estructurales, ecuaciones alométricas, *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, plantaciones forestales, volumen total fuste.

Fecha de recepción/Reception date: 15 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 14 de diciembre de 2018

¹Ex investigador del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. INIFAP. México.

²Posgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. México.
Correo-e: hmsantos@colpos.mx

³Campo Experimental Saltillo. CIR Norte Centro. INIFAP. México.

⁴Campo Experimental Chetumal. CIR Sureste. INIFAP. México.

Introducción

Los factores de expansión de biomasa y el sistema de partición de biomasa aérea son herramientas confiables para su estimación en los bosques nativos y plantaciones forestales comerciales. La biomasa aérea desempeña un papel importante en el manejo sostenible de los recursos forestales y en la cuantificación de los almacenes de dióxido de carbono (CO₂) (Zhang *et al.*, 2017); además, es una medida importante para analizar la productividad, evaluar la cantidad de nutrientes y el ciclo del CO₂ (Aosaar *et al.*, 2016).

En este contexto, los bosques nativos y plantaciones forestales comerciales juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático, mediante el secuestro de dióxido de carbono (Zheng *et al.*, 2015). La cantidad de biomasa contenida en un árbol está influenciada, principalmente, por el tipo de ecosistema en donde se desarrollan las especies, como, la precipitación y temperatura media anual, edad, densidad, productividad potencial del sitio y la silvicultura utilizada, lo que hace necesario generar información a nivel de taxón (Poudel y Temesgen, 2016).

La estimación de la biomasa aérea total a nivel árbol inicia con un muestreo destructivo, y es uno de los métodos más precisos que consiste en la medición directa de cada uno de los componentes: fuste, ramas y follaje, pero por su alto costo y de tiempo requerido, su aplicación se limita a una muestra pequeña (Addo y Rahmad, 2013). Sin embargo, la información derivada de este tipo de medición permite desarrollar métodos indirectos no destructivos, por ejemplo: i) las ecuaciones alométricas desarrolladas mediante regresiones lineales y no lineales, que estiman la biomasa en función del diámetro normal y la altura total (Rodríguez *et al.*, 2012); ii) la densidad básica de la madera, que al multiplicar la densidad por el volumen estimado en árboles individuales calcula la biomasa (Ordóñez *et al.*, 2015) y iii) factor de expansión de biomasa, que multiplica el volumen estimado en árboles individuales por un factor de conversión de m³ a kg (Magalhães y Mate, 2018).

En la actualidad gran parte de las investigaciones enfocadas a la estimación de biomasa se centran en ecuaciones con estructuras matemáticas simples; por ejemplo, las que relacionan una variable independiente, como el diámetro normal (Acosta *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2016); las ecuaciones complejas que permiten describir de mejor manera el patrón de distribución de la biomasa, en este grupo destacan las que relacionan dos o más variables independientes: diámetro normal, altura total, altura de fuste limpio, diámetro de copa viva y la densidad básica de la madera (Djomo y Chimi, 2017; Hernández *et al.*, 2017).

Un método rápido, aplicable, confiable y utilizado frecuentemente para calcular valores indirectos de la biomasa a partir del volumen se basa en los factores de expansión de biomasa. La aplicación de estos es de importancia porque la mayor parte de la información del inventario forestal relacionada con el volumen se estima con facilidad en función del diámetro normal y altura total, lo que facilita convertir el volumen estimado en árboles individuales con un factor de conversión de m³ a kg (Magalhães y Mate, 2018).

Los métodos indirectos permiten estimar la biomasa de forma no destructiva para grandes áreas mediante información derivada de inventarios forestales de sitios con dimensiones fijas o variables; sin embargo, para conocer la proporción de biomasa de fuste, ramas y follaje con respecto a la biomasa aérea total es necesario generar un sistema de partición de biomasa para árboles individuales de la forma:

$$\lambda_i \times B_T,$$

Donde:

λ = Proporción de los componentes

B_T = Biomasa aérea total

El supuesto es que se garantiza la aditividad y se logra que la suma de los componentes sea igual a la biomasa aérea total (Aquino *et al.*, 2015).

Las investigaciones descritas han permitido estimar con precisión la biomasa aérea total y por componentes, pero son pocos los estudios citados en la literatura para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Los más similares son los desarrollados por Chávez-Pascual *et al.* (2013), quienes estimaron la biomasa aérea total mediante los factores de expansión de biomasa en rodales naturales de dicha especie en la comunidad de San Juan Tabaá de la Sierra Norte de Oaxaca.

Las estimaciones de biomasa aérea total en las plantaciones forestales comerciales de *P. chiapensis* es crucial para evaluar su potencial en el secuestro de CO₂; además es un parámetro de interés nacional e internacional debido a su impacto en la mitigación de los efectos del cambio climático; por ello, primero se requiere de herramientas estadísticas confiables para estimar la biomasa aérea total. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue desarrollar factores de expansión de biomasa constante y variable, así como de un sistema de partición para estimar la biomasa aérea total y por componentes en plantaciones forestales comerciales de para *P. chiapensis*, en Tlatlauquitepec, Puebla.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en 87 ha plantadas de *P. chiapensis*, establecidas en el predio El Campanario, ubicado en la localidad de Chicuaco, municipio Tlatlauquitepec, Puebla (Figura 1). La información proviene de 35 árboles muestreados y derribados en 2014, distribuidos sistemáticamente en edades de 3 a 7 años. Estas plantaciones se localizan entre los 19°46'10.6" N y 97°28'34.6" O. Las plantas provienen de semillas de árboles selectos de la región, producidos en tres viveros forestales certificados: Mazatepec (Tlatlauquitepec), Esperanza de la Mañana (Cuetzalan) y Atoluca (Teziutlán); se colocaron en terrenos que antes se destinaban a la producción frutícola y cafetalera (Fierros *et al.*, 2018).

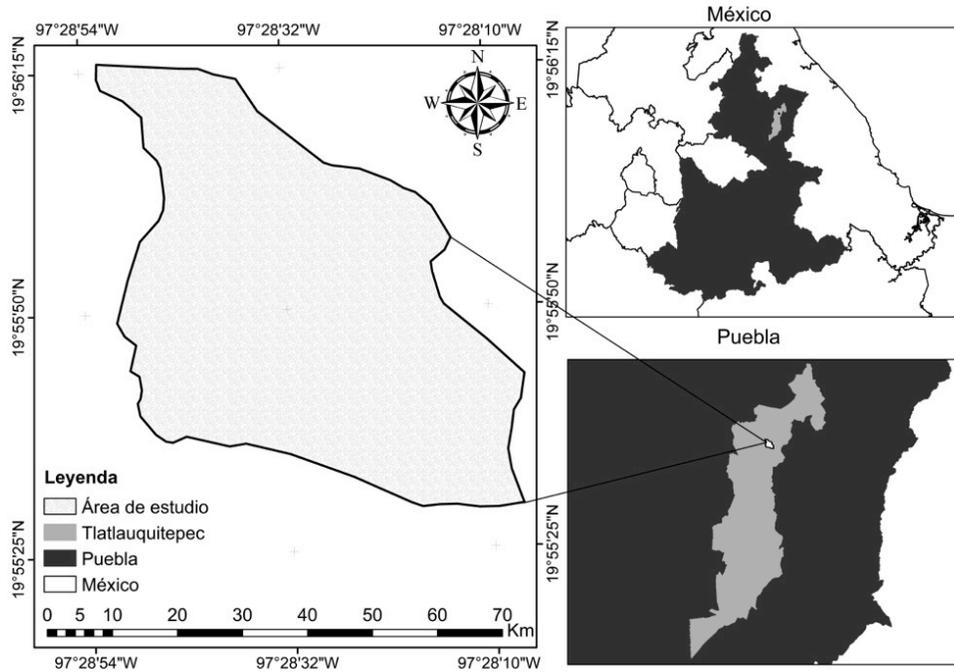


Figura 1. Localización del área de estudio.

La plantación (PFC) se estableció a una densidad de 1 100 árboles ha⁻¹, en marco real con un espaciamiento de 4 m entre filas y 2.25 m entre plantas. El clima es semicálido húmedo con lluvias todo el año, con una temperatura media anual de 17 °C y precipitación media anual de 2 350 mm. Los suelos predominantes en Tlatlauquitepec son Andosol con 68 %: Acrisol con 12 %; Phaeozem con 5.5 % y Leptosol con 2 % (Inegi, 2009).

Muestreo de biomasa por componentes

Con la metodología directa se muestrearon 35 árboles de *P. chiapensis* de edades diferentes (3, 5, 6 y 7 años) en 2014, para lo cual se seleccionaron individuos sin daño físico y que cubrieran todas las categorías de diámetros y alturas. El derribo se realizó a 5 cm sobre el nivel del suelo; posteriormente, a cada árbol se le midieron las variables

siguientes: altura total (H en m medida con cinta métrica Truper de 30 m) y el diámetro normal (D en cm medido con forcípula Haglof Mantax Blue de 50 cm).

En los individuos derribados se separaron el fuste, las ramas y el follaje, posteriormente se seccionó el fuste, la primera troza se cortó a 1.20 m de longitud y los restantes a 2.40 m hasta llegar a la punta del árbol, se registró el peso en verde (kg), con una báscula de plataforma *Oken* de 120 kg modelo K-1. Para la primera troza, se obtuvieron dos rodajas (inferior y superior) y para las otras solo la superior, con promedio de 5 cm de grosor, anotando el diámetro con corteza (DCC,) y el peso en verde (kg) con una báscula electrónica *Torrey*[®] serie L-EQ-10, de 10 kg. Para el peso verde total de las ramas y follaje se tomaron muestras al azar de 1 kg y 1/2 kg de ramas y follaje, respectivamente. En laboratorio se determinó el peso seco por componentes, luego de ser secada en una estufa *Sheldon* modelo 1675-S, a 75 °C, hasta obtener el peso seco constante.

Estimación de biomasa por componente

La biomasa se estimó para fuste (B_F), ramas (B_R) y follaje (B_H), con base en la metodología sugerida por Repola y Ulvcróna (2014) en función del estimador de razón (r), en la relación del peso seco (ps) y el peso verde (pv) de las muestras de los componentes. El estimador de r se utilizó para convertir el peso verde total por componentes (PV_i) a biomasa. La B_F , B_R y B_H se calculó mediante la ecuación (1):

$$B_i = PV_i \times r \quad (1)$$

Donde:

B_i = Biomasa por componentes

PV_i = Peso verde total por componentes

r = Estimador de razón

Factor de expansión de biomasa constante y variable

La biomasa aérea total puede estimarse mediante un factor de expansión de biomasa (FEB) constante o variable, al convertir el volumen (V en m^3) a biomasa (B_T en kg). Por tanto, se parte del supuesto de que el V es una función lineal directa del $D^2 \times H$, esto hace posible calcular la biomasa aérea total como una proporción directa del volumen total del fuste multiplicada por un FEB constante con la ecuación (2) (Hernández *et al.*, 2017):

$$B_T = \vartheta \times V \quad (2)$$

Donde:

B_T = Biomasa aérea total (kg)

ϑ = FEB constante

V = Volumen total del fuste (m^3) estimado con la ecuación de volumen de tipo Schumacher y Hall (1933), generada para la misma especie estudiada y plantación por Martínez (2016)

La función V presentó un valor de coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2) de 99.66 % y raíz del cuadrado medio de error (RMSE) de 0.0058. El V se estimó mediante la ecuación (3):

$$V = 0.000065 \times D^{1.630512} \times H^{1.15635} \quad (3)$$

Donde:

V = Volumen total fuste (m^3)

D = Diámetro normal (cm)

H = Altura total (m)

Del razonamiento anterior, generar un FEB variable puede resultar más realista que el FEB constante, ya que este último asume, precisamente, que la proporción de biomasa se mantiene constante, lo cual no es completamente cierto, porque a edades diferentes y calidad de sitio, el FEB presenta una variación diferencial significativa en un árbol (Enes y Fonseca, 2014). El FEB variable es una forma de analizar cómo varía la biomasa en función del tamaño (D y H) del árbol, y una forma de generarlo es a partir de la relación de la ecuación (5) de biomasa aérea total generada para la misma especie estudiada y plantación por Martínez (2016), en la que la función de biomasa aérea total presentó un valor de coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2) de 98.44 % y raíz del cuadrado medio de error (RMSE) de 9.44 y la ecuación (3), tal como se expresan en la ecuación general (4) (Pajtík *et al.*, 2008).

$$FEB = \frac{B_T}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{\alpha_1 X^{\beta_1}}{\alpha_2 X^{\beta_2}} = \alpha D^\beta \quad (4)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

$$\beta = \beta_1 - \beta_2$$

$$B_T = 0.128525 \times (D^2 H)^{0.80311} \quad (5)$$

Donde:

FEB = Factor de expansión de biomasa variable

α_i, β_i = Parámetros de la ecuación de B_T y V

B_T = Biomasa aérea total (kg)

V = Volumen total fuste (m^3)

La biomasa aérea total se obtiene al multiplicar el FEB constante y variable por el V estimado para cada árbol medido en los inventarios forestales, mediante la ecuación (6) (Magalhães y Seifert, 2015):

$$B_T = FEB \times V \quad (6)$$

Donde:

B_T = Biomasa aérea total (kg)

FEB = Factor de expansión de biomasa

V = Volumen total fuste (m³)

Sistema de partición de distribución biomasa aérea

Si bien la estimación del FEB permite estimar la biomasa aérea total derivada de un inventario forestal (Magalhães y Seifert, 2015), aún se desconoce la distribución de la biomasa por componentes de los individuos provenientes de una plantación bajo manejo de *P. chiapensis*. Por lo anterior, se procedió a generar un sistema de partición de biomasa aérea mediante la expresión (7):

$$B_i = \lambda_i \times B_T \quad (7)$$

Donde:

B_i = Biomasa por componentes

λ_i = Proporción de la biomasa por componentes con respecto a la B_T

B_T = Biomasa aérea total

Para conocer la distribución de la biomasa en los componentes del árbol, se ajustó una función directa de la biomasa aérea total y un factor de partición λ_i , como se indica en la ecuación (8) (Aquino *et al.*, 2015):

$$B_i = f_i \times (\lambda_i, B_T) + \varepsilon \quad (8)$$

Donde:

B_i = Biomasa por componentes

f_i = Función que define la biomasa de los componentes

λ_i = Proporción de la biomasa por componentes con respecto a la B_T ,

B_T = Biomasa aérea total

ε = Error aleatorio

Del cual se deriva un sistema de ecuaciones de la forma siguiente:

$$B_F = g(\lambda_1, B_T) + \varepsilon \quad (9)$$

$$B_R = \boxtimes(\lambda_2, B_T) + \varepsilon \quad (10)$$

$$B_H = i(\lambda_3, B_T) + \varepsilon \quad (11)$$

Donde:

B_F = Biomasa de fuste

B_R = Biomasa de ramas

B_H = Biomasa de follaje

B_T = Biomasa aérea total

$g(\lambda_1, B_T)$, $h(\lambda_2, B_T)$, $i(\lambda_3, B_T)$ = Funciones que definen la biomasa de los componentes

ε = Error aleatorio

λ_i = Vectores de los parámetros utilizados en el ajuste e indican la proporción de la biomasa por componentes

Por lo tanto, la aditividad se garantiza con las restricciones lineales sobre los coeficientes de regresión, de tal manera que la suma de la biomasa de los componentes sea igual a la biomasa aérea total, mediante la ecuación (12) (Parresol, 2001):

$$B_T = B_F + B_R + B_H = \{[g(\lambda_1, B_T) + \varepsilon] + [\mathcal{X}(\lambda_2, B_T) + \varepsilon] + [\mathcal{X}(\lambda_3, B_T) + \varepsilon]\} \quad (12)$$

Métodos de ajuste de los modelos

El ajuste del factor de expansión de variable y del sistema de partición de biomasa aérea fueron realizados con el método SUR (por sus siglas en inglés) o Regresiones Aparentemente No Relacionadas (SAS, 2011). El procedimiento SUR homogeneizó y optimizó el error estándar de los parámetros; con ello se obtuvo la compatibilidad completa en el sistema de partición de biomasa aérea, y se generó una varianza menor así como resultados eficientes en las predicciones (Parresol, 2001).



Resultados y Discusión

Características de los atributos forestales de *P. chiapensis*

El diámetro normal de los árboles muestreados se registró en un intervalo de 3.20 a 26.50 cm, altura total de 4.25 a 17.05 m y biomasa aérea total 2.46 a 220.52 kg (Cuadro 1). El fuste fue el componente con un gran aumento en la proporción de biomasa al aumentar el diámetro y altura total. La validez de los factores de expansión de biomasa y del sistema de participación de biomasa aérea se restringen a los valores mínimos y máximos de las variables dasométricas, esto implica que solo pueden aplicarse para la especie estudiada y para la misma región.

Cuadro 1. Atributos forestales de los árboles muestreados.

Variables	N	Media	Mínimo	Máximo	D.E.
Diámetro normal (cm)	35	15.20	3.20	26.50	6.76
Altura total (m)	35	11.08	4.25	17.05	3.79
Biomasa de fuste (kg)	35	59.89	1.10	157.99	48.27
Biomasa de ramas (kg)	35	18.92	0.48	47.40	14.53
Biomasa de follaje (kg)	35	8.62	0.72	20.99	6.23
Biomasa aérea total (kg)	35	87.44	2.46	220.52	68.62
Edad (años)	35	5.63	3.00	7.00	1.52

N = Número de observaciones; D.E. = Desviación estándar.



Factor de expansión de biomasa constante

Los resultados de los estadísticos de ajuste del FEB constante presentaron un valor de 97.51 % en el coeficiente de determinación ajustada (R_{adj}^2) y un error promedio de 10.9183 kg en la raíz del cuadrado medio del error (RMSE). El valor del estimador del parámetro ϑ mostró alta significancia ($p < 0.0001$). Por lo que la ecuación (2) para estimar la biomasa aérea total en función de un FEB constante (ϑ) queda de la siguiente manera:

$$B_T = 709.8016 \times V \quad (2)$$

Donde:

B_T = Biomasa aérea total (kg)

V = Volumen total del fuste con corteza (m^3)

El valor estimado del parámetro ϑ que representa el FEB constante fue de 709.8016, lo que sugiere que por cada m^3 existen 709 kg de biomasa aérea total en *P. chiapensis*.

En coníferas, la biomasa seca del fuste y el volumen de fuste tienen un FEB aproximadamente constante de 500 kg m^3 ; la diferencia de este valor da una idea de la proporción de ramas y hojas. Con el enfoque del presente este estudio, Cruz (2007) estimó, en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo, un valor de 623.2698 kg m^3 para *Pinus teocote* Schltdl. & Cham; mientras que, para las latifoliadas: *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Quercus* spp, *Clethra mexicana* D.C., *Prunus serotina* Ehrh ssp. *capuli* (Cav.) Mc Vaugh, *Alnus jorullensis* Kunth subsp *lutea* Furlow, *Carpinus caroliniana* Walter y *Viburnum ciliatum* Greenm., el FEB estimado fue de 905.1358 kg m^3 . El autor denotó una mayor proporción de biomasa de ramas respecto a la biomasa del fuste.

Algo similar cita Aquino (2014) con valores de FEB de 1 358.5 y 998.56 kg m³ para las especies tropicales *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd, respectivamente. En el trabajo realizado por Chávez- Pascual *et al.* (2013) reportaron un FEB promedio de 443.53 para *P. chiapensis*, en rodales naturales en la Sierra Norte de Oaxaca bajo aprovechamiento forestal. Los autores señalan que la biomasa de ramas y follaje representaron 7.5 % de la biomasa aérea total, mientras que en este estudio fue de 31 % y un FEB de 709.9016.

Sin duda, las variaciones de biomasa de ramas y follaje están más influidas por las edades jóvenes, las funciones fisiológicas y morfológicas, y las prácticas silvícolas aplicadas (control de maleza y podas) a los árboles de *P. chiapensis*. Estas últimas como las observadas durante el registro de datos: en edades de 3 a 7, todos los árboles estaban podados y se observaron medidas de control de vegetación, lo cual origina el desarrollo de copas amplias y bien conformadas. Fierros-Mateo *et al.* (2017) documentaron para la misma plantación, que los tratamientos silviculturales como podas y control de maleza aplicadas a la masa de *P. chiapensis* en edades tempranas (primer año de plantación) originan altas tasas de crecimiento, y, consecuentemente, un robusto desarrollo de copas que permite una mayor eficiencia fotosintética para la transformación a biomasa aérea.



Factor de expansión de biomasa variable

El FEB variable expresado por la ecuación (13) se obtuvo al sustituir los valores de los parámetros de la ecuación de biomasa aérea total y de volumen total del fuste mediante la expresión (4):

$$FEB = \frac{B_T \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{V} = \frac{0.128525 \times (D^2 H)^{0.80311}}{0.000065 \times D^{1.630512} \times H^{1.15635}} \quad (4)$$

$$FEB = 1977.30769231 \times (D^{-0.024292} H^{-0.35324}) \quad (13)$$

Con la ecuación (13) es posible observar como el FEB variable se modifica de acuerdo a las dimensiones de los árboles (Figura 2), lo que conduce a predicciones de biomasa más precisas (Chávez-Pacual *et al.*, 2013), ya que reflejan de manera indirecta los cambios en la proporción de los componentes.

El FEB variable por categoría diamétrica refiere los cambios en el balance de la biomasa de fuste respecto a biomasa de ramas y follaje. A medida que aumenta el D y H la biomasa se incrementa, pero el FEB variable tiende a estabilizarse en categorías diamétricas (CD) de 20 cm de D y H de 15 m, dado que el fuste del árbol empieza a concentrar una mayor cantidad de biomasa. Posiblemente en esta etapa, el nivel de contribución de la rama a la biomasa total del árbol se estabiliza y el porcentaje de follaje continúa disminuyendo. Es probable que esto se relaciona con recursos limitados de luz bajo condiciones de dosel cerrado y como consecuencia las limitaciones para la supervivencia del follaje (Konôpka *et al.*, 2015). Silva y Návar (2010) y Chávez-Pascual *et al.* (2013) indicaron la misma variación, debido a que los FEB variable son dependientes de las dimensiones del árbol, como, el D y la H.

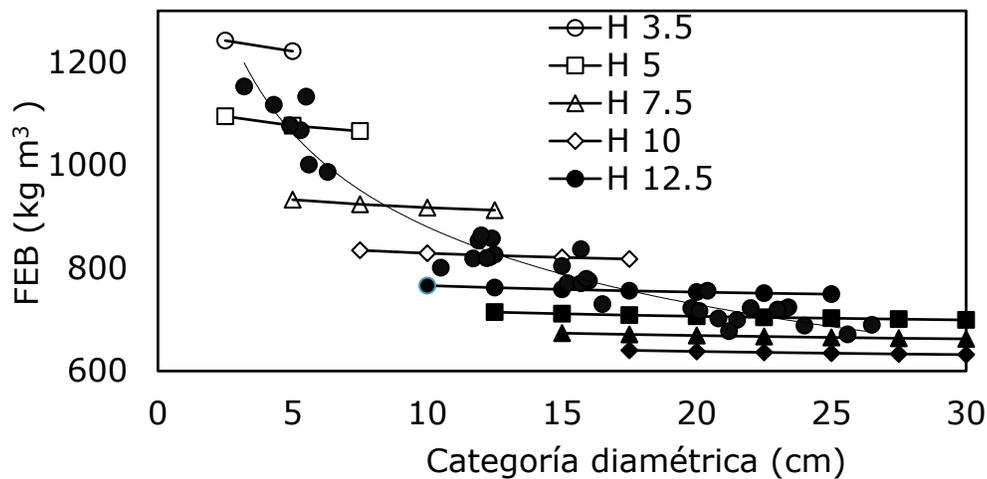


Figura 2. Factores de expansión de biomasa variable por categorías diamétricas y de alturas muestreadas, estimada a partir de la ecuación 15.

Dicho comportamiento es similar al descrito por Chávez-Pascual *et al.* (2013) para rodales naturales bajo manejo de *P. chiapensis* en la Sierra Norte de Oaxaca, y a lo registrado por Hernández *et al.* (2017) para *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en plantaciones forestales comerciales de edades de 1 a 7 años en Humanguillo, Tabasco.

Enes y Fonseca (2014) registran una tendencia similar del FEB variable para rodales naturales de *Pinus pinaster* Ait en el Norte de Portugal. De acuerdo con Konôpka *et al.* (2015), el FEB variable decrece progresivamente como una contribución de los componentes de los árboles que cambia con el aumento del tamaño del árbol (D y H), en el que se observa un cambio significativo para individuos más pequeños.

Sin duda, estos cambios obedecen a la estrategia de crecimiento cambiante desde etapas tempranas (donde la intención primaria es ocupar suficiente espacio en el suelo) hasta posteriores (para competir con árboles vecinos por luz). Pajtík *et al.* (2008) mencionan que la cantidad de luz captada por la copa en los árboles jóvenes es de 100 % y las ramas, por lo tanto, representan más biomasa de rama, lo que explica un mayor FEB variable. Sin embargo, después de que se cierra la copa del dosel, la proporción de biomasa de ramas disminuye significativamente junto con la

cantidad de luz que es interceptada por la copa; en consecuencia, el FEB variable, debido a que el fuste empieza a concentrar mayor cantidad de biomasa.

En la Figura 3 se observa que la biomasa aérea total calculada con el factor de expansión de biomasa variable es más conservadora, de acuerdo con la tendencia de biomasa aérea total observada.

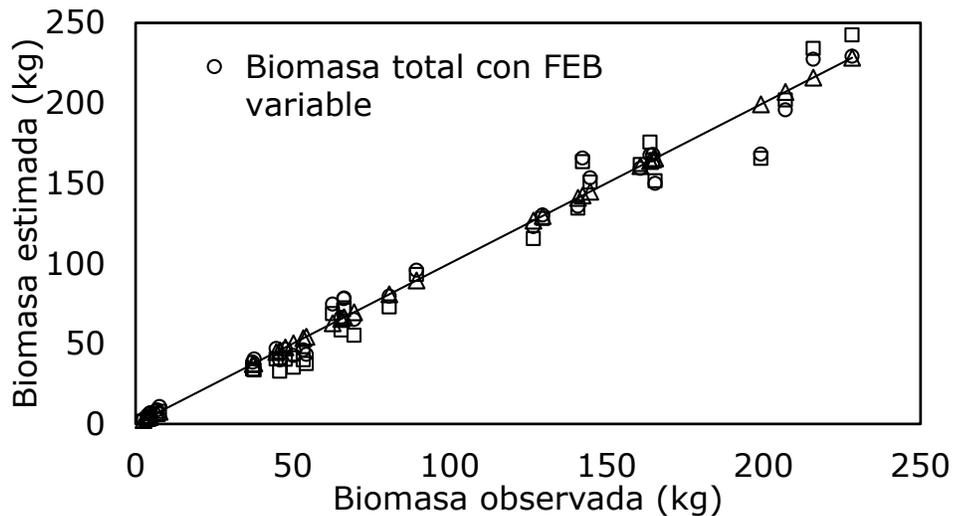


Figura 3. Relación de la biomasa aérea total predicho con el FEB constante y variable en función de la biomasa aérea total observada (kg).

Para estudios futuros en las plantaciones será muy difícil obtener directamente la biomasa aérea total; por ello, se sugiere utilizar el factor de expansión de biomasa variable ya que presenta mayor confiabilidad, con el propósito de estimar la biomasa aérea total de manera indirecta para árboles medidos en los inventarios forestales.

Sistemas de partición de biomasa

En el Cuadro 2 se resumen los estadísticos de bondad de ajuste del sistema de partición de biomasa: raíz del cuadrado medio del error (RMSE), coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{adj.}$) y los estimadores de los parámetros. Los resultados

indicaron que a la biomasa de fuste presentó el valor más alto en el R^2_{adj} con 99.56 %, seguida de la biomasa de follaje con 97.28 % y por último le siguen la biomasa de ramas con 96.37 %.

Las variables independientes del D y H se ajustaron bien a los datos de biomasa, explicando una variación superior a 96 % para la predicción de la biomasa por componentes. Mientras que, los valores en RMSE fueron de 3.21, 2.76 y 1.02 para biomasa de fuste, ramas y follaje, respectivamente. Los parámetros γ_i son altamente significativos en la prueba de hipótesis, dado a que su probabilidad asociada es menor al nivel de significancia de 5 % ($\alpha = 0.05$). Los valores γ_i representan la proporción de biomasa por componente, con respecto a la biomasa aérea total.

Cuadro 2. Estadísticos de ajuste, valores y significancia de los parámetros del sistema de partición de biomasa aérea.

Componentes	RMSE	R^2_{adj}	ρ	Ψ_i	∞
Fuste	3.2101	0.9956	γ_1	0.691336	<0.0001
Ramas	2.7675	0.9637	γ_2	0.213308	<0.0001
Follaje	1.0285	0.9728	γ_3	0.095355	<0.0001

ρ = Parámetro del sistema de partición de biomasa aérea; Ψ = Valor de los estimadores de los parámetros; ∞ = Nivel de significancia de los estimadores de los parámetros.

Los valores de γ_i indican que la mayor acumulación de biomasa se concentra en el fuste con 69 %, seguida con 21 % en ramas y 10 % para la biomasa del follaje (Cuadro 3). Estos resultados son similares a los de Soriano *et al.* (2015) con las proporciones de biomasa para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham.: fuste (68.2 %), ramas (14.3 %), follaje (8.2 %) y corteza (9.3 %), lo que se explica porque ambas especies tienen tasas de crecimiento parciales (rápidas) y comparten hábitats del bosque mesófilo.

Martínez *et al.* (2016) determinaron 81 % para fuste, 14 % de ramas y 5 % de follaje en *P. ayacahuite* var *veitchii* Shaw en rodales naturales de Ixtlán, Oaxaca. Esta distribución difiere a lo citado *s estudios reportados* por Rodríguez *et al.* (2012) para una plantación de *P. patula* de 14 años, cuya proporción de biomasa de fuste fue de 92.9 %, de ramas de 4.7 % y follaje de 2.4 %. Lo anterior demuestra que la proporción de follaje de *P. patula* tiene mayor eficiencia fotosintética respecto a *Pinus chiapensis*. No obstante, también se puede atribuir a los aclareos efectuados en la plantación, lo que generó más concentración en biomasa de fuste. Esto concuerda con los estudios de Chávez-Pascual *et al.* (2013), quienes registraron distribuciones de biomasa de fuste de 92.5 %, ramas con 6.3 % y follaje con 1.2 % para rodales de *P. chiapensis* bajo manejo.

En coníferas, contrasta la distribución de biomasa con la derivada en especies de climas tropicales como *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd. que presentan, generalmente, una mayor concentración de biomasa de ramas y follaje (54.32, 50.58, 59.26 %, respectivamente) que en biomasa de fuste (40.69, 38.53, 33.65 %, respectivamente) (Aquino *et al.*, 2015).

Se conformó un sistema de ecuaciones para árboles individuales de la siguiente manera: la ecuación (69) calcula la biomasa aérea total a nivel árbol, que multiplica el factor de expansión de biomasa variable (13) por el volumen total fuste (3).

$$FEB = [1977.30769231 \times (D^{-0.024292}H^{-0.35324})] \quad (13)$$

$$V=0.000065 \times D^{1.630512} \times H^{1.15635} \quad (3)$$

$$B_T = FEB \times V \quad (6)$$

Entonces, una vez estimada la biomasa aérea total es posible conocer la proporción por componentes, al sustituir los valores γ_i estimados en el sistema de partición de biomasa aérea, mediante las expresiones 9, 10 y 11. Con este sistema se cumple la aditividad (12), además permite construir una tabla de rendimiento de biomasa aérea total y por componentes, en función del D y H (Cuadro 3).

$$B_F = 0.691336 \times B_T \quad (9)$$

$$B_R = 0.211336 \times B_T \quad (10)$$

$$B_H = 0.095355 \times B_T \quad (11)$$

$$B_T = B_F + B_R + B_H \quad (12)$$



Cuadro 3. Distribución de biomasa aérea total y por componentes, para cada categoría de diámetro normal y altura total.

CD	Categoría de altura																			
	B _F	B _R	B _H	B _T	B _F	B _R	B _H	B _T	B _F	B _R	B _H	B _T	B _F	B _R	B _H	B _T	B _F	B _R	B _H	B _T
	5	5	5	5	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20	20	25	25	25	25
5	4	1	1	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	23	7	3	33	32	10	4	46	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	44	13	6	63	61	19	8	88	76	24	11	110	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	96	30	13	139	121	37	17	175	145	45	20	210
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	173	53	24	251	207	64	29	300
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	232	72	32	336	278	86	38	402

B_F = Biomasa de fuste; B_R = Biomasa de ramas; B_H = Biomasa de follaje; B_T = Biomasa aérea total; CD = Categoría diamétrica; - = No existen valores.

Conclusiones

Los factores de expansión de biomasa generados para estimar la biomasa aérea total en las plantaciones forestales comerciales de *Pinus chiapensis* incluyen variables predictoras de fácil medición en los inventarios forestales, como el diámetro normal y altura total, lo que facilita convertir el volumen total fuste a biomasa aérea total. El sistema de ecuaciones de partición de biomasa aérea garantiza la aditividad y genera estimaciones más precisas. Con este sistema es posible calcular la biomasa por componentes a partir de la información generada en los inventarios forestales, la cual es fundamental para transformar la biomasa a carbono capturado en las plantaciones de *P. chiapensis*.

Agradecimientos

Un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la Beca N° 371797 otorgada para el desarrollo de los estudios de maestría; al Posgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y al Ing. Oscar Lemini por su apoyo para llevar a cabo la investigación en el Predio El Campanario.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Luis Martínez Ángel: análisis de datos y redacción del manuscrito original; Héctor Manuel De los Santos Posadas: diseño del estudio; Aurelio Manuel Fierros González: desarrollo de la metodología; Ramiro Pérez Miranda: desarrollo de la metodología; Reynol Fierros Mateo: revisión del manuscrito original; Adrián Hernández Ramos y Jonathan Hernández Ramos: revisión del manuscrito final.

Referencias

- Acosta M., M., F. Carrillo A. y R. G. Gómez V. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque Mesófilo de Montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4):529-543.
- Aosaar, J., Ü. Mander, M. Varik, H. Becker, G. Morozov, M. Maddison and V. Uri. 2016. Biomass production and nitrogen balance of naturally afforested silver birch (*Betula pendula* Roth.) stand in Estonia. *Silva Fennica* 50(4):1-19.
- Addo F., P. and Z. B. Rahmad. 2013. Development of allometric equations for estimating above-ground *Liana* biomass in tropical primary and secondary forests, Malaysia. *International Journal of Ecology* 2013:1-8.
- Aquino R., M. 2014. Estimación de volumen, biomasa y carbono aéreo en tres especies arbóreas de Pluma Hidalgo, Oaxaca. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx., México. 73 p.
- Aquino R., M., A. Velázquez M., J. F. Castellanos B., H. De los Santos P. y J. D. Etchevers B. 2015. Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia* 49(3):299-344.
- Carrillo A., F., M. Acosta M., C. R. Jiménez C., L. González M. y J. D. Etchevers B. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3): 682-691.
- 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. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6:1273-1284.

Cruz M., Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx., México. 37 p.

Djomo, A. N. and C. D. Chimi. 2017. Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management* 391:184-193.

Enes, T. D. and T. F. Fonseca. 2014. Biomass conversion and expansion factors are affected by thinning. *Forest Systems* 23(3):438-447.

Fierros-Mateo, R., H. M. De los Santos-Posadas, M. A. Fierros-González y F. Cruz-Cobos. 2017. Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Agrociencia* 51(2):201-214.

Fierros M., R., H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., F. Cruz C., L. Martínez Á., E. Velasco B. y G. Quiñones B. 2018. Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47):131-150.

Hernández R., J., H. M. De los Santos P., J. R. Valdez L., J. C. Tamarit U., G. Ángeles P., A. Hernández R., A. Peduzzi y O. Carrero. 2017. Biomasa aérea y factores de expansión de biomasa en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia* 51(8):921-938.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. 2016.

http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21186.pdf (10 de diciembre 2017).

Konôpka, B., J. Pajtík and V. šebeň. 2015. Biomass functions and expansion factors for young trees of European ash and Sycamore maple in the Inner Western Carpathians. *Austrian Journal of Forest Science* 132(1):1-126.

- Magalhães, T. M. and T. Seifert. 2015. Tree component biomass expansion factors and root-to-shoot ratio of Lebombo ironwood: measurement uncertainty. *Carbon Balance and Management* 10(9):1-14.
- Magalhães, T. M. and R. S. Mate. 2018. Least squares-based biomass conversion and expansion factors best estimate biomass tan ratio-based ones: statistical evidences based on tropical timber species. *MethodsX* 5:30-38.
- Martínez Á., L. 2016. Estimación de volumen y biomasa aérea para plantaciones forestales de *Pinus chiapensis* en Tlaltlauquitepec, Puebla. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx. 79 p.
- Martínez, A., G. Rodríguez O., J. R. Enríquez del V., M. I. Pérez L., E. Castañeda H. y W. Santiago G. 2016. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(7): 1575-1584.
- Ordóñez D., J. A. B., A. Galicia N., N. J. Venegas M., T. Hernández T., M. J. Ordóñez D. y R. Dávalos S. 2015. Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21(núm. especial):77-126.
- Pajtík, J. B. Konôpka and M. Lukac. 2008. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*picea abies* [L.] Karst) trees. *Forest Ecology and Management* 256:1096-1103.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31:865-878.
- Poudel, K. P. and H. Temesgen. 2016. Methods for estimating aboveground biomass and its components for Douglas-fir and lodgepole pine trees. *Canadian Journal Forest Research* 46(1):77-87.
- Repola, J. and K. A. Ulvcrona. 2014. Modelling biomass of young and dense *Scots pine* (*Pinus sylvestris* L.) dominated mixed forests in northern Sweden. *Silva Fennica* 48(5):1-21.

Rodríguez O., G., H. M. De Los Santos P., V. A. González H., A. Aldrete, A. Gómez G. y A. M. FierrosG. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1):25-45.

Schumacher, F. X. and F. D. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal Agricultural Research* 47(9):719-734.

Silva A., F. M. y J. J. Návar Ch. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del Norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1):55-62.

Soriano L., M. Á., G. Ángeles P., T. Martínez T., O. Plascencia-E y R. Razo Z. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49(4):423-438.

Statistical Analysis System (SAS). 2011. SAS/ETS® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC USA. pp. 1023-1135.

Zhang, X., Q. V. Cao, C. Xiang, A. Duan and J. Zhang. 2017. Predicting total and component biomass of Chinese fir using a forecast combination method. *iForest* 10:687-691.

Zheng, C., E. G. Mason, L. Jia, S. Wei, C. Sun and J. Duan. 2015. A single-tree additive biomass model of *Quercus variabilis* Blume forests in North China. *Trees* 29:705-716.