



Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas

Aboveground biomass compartments of *Pinus oaxacana* stands under silvicultural regimes

Edwin Yoshimar Chávez-Pascual¹, Gerardo Rodríguez-Ortiz^{1*}, José Raymundo Enríquez-del Valle¹,
Vicente Arturo Velasco-Velasco¹ y Martín Gómez-Cárdenas²

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Xoxocotlán, Oaxaca, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia. geraro65@gmail.com

RESUMEN

Quantificar la biomasa forestal aérea del bosque es importante para evaluar la productividad y el efecto de sistemas silvícolas aplicados. El objetivo fue generar modelos alométricos para estimar biomasa aérea de *Pinus oaxacana* y mezcla de especies asociadas en respuesta a tratamientos silvícolas. En Ixtlán, Oaxaca, México, durante 2014 se establecieron 12 unidades experimentales de 400 m² en rodales sometidos a diferente tratamiento silvícola: 1) sin tratamiento (conservación), 2) árboles padres, con regeneración de 10 años de edad, 3) árboles padres con regeneración de 15 años de edad, 4) matarrasa, con regeneración de siete años de edad. Con datos obtenidos mediante muestreo destructivo (n = 69 individuos) se construyeron modelos alométricos de biomasa de los compartimentos parciales y totales de *P. oaxacana*, arbustivo, en el piso forestal y sotobosque. En experimento mediante diseño completamente aleatorizado, los datos se sometieron a análisis de varianza, prueba de separación de medias (Duncan, 0.05), análisis clúster y modelos de regresión. Los modelos que utilizan variables de fácil medición, estiman entre 88% y 98% de la biomasa aérea de individuos de porte arbóreo y arbustivo de *P. oaxacana* y especies arbustivas asociadas. Los tratamientos silvícolas aplicados afectaron ($p \leq 0.05$) la biomasa aérea acumulada en los compartimentos específicos y totales de *P. oaxacana*, así como la biomasa contenida en el piso forestal, sotobosque y total aéreo. Sin embargo, los rodales manejados bajo tratamientos de árboles padres (101.3 t ha⁻¹) igualan la productividad de biomasa total aérea que el bosque bajo conservación (125.74 t ha⁻¹).

PALABRAS CLAVE: árboles padres, matarrasa, modelo alométrico, sistemas silvícolas aplicados.

ABSTRACT

Quantifying forest biomass of the forest is important in order to evaluate productivity and silvicultural regime effect. The objective of this study was to generate allometric models to estimate aboveground biomass of *Pinus oaxacana* and mixture of associated species as a response to silvicultural regimes. In Ixtlán, Oaxaca, Mexico, during 2014, 12 experimental units of 400 m² were established in stands under different silvicultural regimes: 1) without treatment (conservation), 2) seed trees with 10-year regeneration, 3) seed trees with 15-year regeneration, 4) clearcutting with 7-year regeneration. With data obtained through destructive sampling (n = 69 individuals), allometric biomass models from the partial and total compartments of *P. oaxacana*, shrubby, in the forest floor and undergrowth were adjusted. In experiment under completely randomized design data were solved by analysis of variance, means test (Duncan, 0.05), cluster analysis and regression models. Allometric models that estimate between 88% and 98% of the aboveground biomass of *Pinus oaxacana* trees and shrubs and bush associated species use variables with easy measurement. The silvicultural regimes applied affected ($p \leq 0.05$) aboveground biomass accumulated in specific and whole compartments of *P. oaxacana*, also the biomass in the forest floor, undergrowth and total aboveground. Likewise, stands under seed trees management (101.3 t ha⁻¹) have the same aboveground total biomass than the conservation forest (125.74 t ha⁻¹).

KEY WORDS: seed trees, clearcutting method, allometric model, applied forestry systems.

INTRODUCCIÓN

Debido al aumento del CO₂ atmosférico se han implementado estrategias para reducir su efecto en el ambiente, a través de procesos bióticos o abióticos; uno de estos comprende la fijación del CO₂ presente en la atmósfera como biomasa mediante el proceso de fotosíntesis en las plantas (Kimble, Lal y Follet, 2002; Díaz-Franco *et al.*, 2007). Los procesos de liberación de C se pueden revertir al conservar y proteger los ecosistemas arbóreos, arbustivos y estratos menores; además, el manejo sustentable de los bosques ofrece oportunidades de actividad económica y otros servicios ambientales, constituyéndose como factor de desarrollo de un país (White, Cannel y Friend, 2000; Dauber, Terán y Guzmán, 2003).

Los estudios de captura y flujo de C se basan en la estimación de materia seca o biomasa vegetal (Chávez-Pascual *et al.*, 2013); son importantes para conocer la estructura, funcionamiento y dinámica de los sistemas forestales, en los que se cuantifica el C orgánico por componente del árbol. Además, es un parámetro que caracteriza a los ecosistemas para acumular materia orgánica, ya sea aérea o subterránea (Eamus, McGuinness y Burrows, 2000; Schlegel, Gayoso y Guerra, 2000; Montero, Muñoz, Donés y Rojo, 2004; Ruíz-Aquino *et al.*, 2014).

Su estimación requiere de análisis destructivo directo o de estimaciones basadas en relaciones alométricas con base a dimensiones de los árboles; las ecuaciones que emplean el diámetro a la altura de pecho (DAP) y la altura del árbol mejoran la precisión en la estimación de biomasa (Acosta-Mireles, Vargas-Hernández, Velázquez-Martínez y Etchevers-Barra, 2002; Návar, 2009; Sampaio *et al.*, 2010; Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas, Tinoco-Rueda y Etchevers-Barra, 2011; Chávez-Pascual *et al.*, 2013). Estas son típicamente específicas para condiciones de sitio, manejo y especie (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011a).

Dentro de los ecosistemas forestales, los principales componentes de biomasa vegetal son fuste, ramas, corteza, follaje, estructuras reproductivas, raíces (Ayala-López, De Jong-Bergsma y Ramírez-Maldonado, 2001); para tener datos más exactos de fijación de biomasa aérea en ecosistemas forestales es necesario incluir la

estimación del estrato herbáceo, piso forestal y desfronde. Estimar la cantidad de biomasa en especies herbáceas resulta fundamental por su relación directa con el C (Barrio, Balboa, Castedo, Diéguez y Álvarez, 2006), que permite un estudio integral de los sistemas forestales como sumidero de C.

En un ecosistema las estimaciones de reservas de C pueden realizarse mediante el cálculo de la biomasa arborea, contenido de C en el suelo, mantillo, capa de fermentación, hierbas y arbustos (Zianis y Mencuccini, 2003). El suelo (piso forestal), debe ser incluido pues almacena grandes cantidades de C a través de la biomasa procedente de la abscisión de órganos de las plantas (Schulp, Nabuurs, Verburg y de Waal, 2008).

De acuerdo con Álvarez y Rubio (2013), los gestores forestales se han enfocado a la producción de madera, pero ahora se ven en la necesidad de incorporar factores ambientales como la conservación de la riqueza biológica y el secuestro de C en sus criterios de manejo, ya que las prácticas de manejo al bosque son capaces de modificar algunos factores como, temperatura, humedad del suelo y claros de luz. Autores como Jandl *et al.* (2007), mencionan que los bosques manejados durante turnos largos aseguran un menor disturbio en el secuestro de C. Los bosques templados de Australia han presentado un potencial para almacenar cantidades significativas de C, acumulando hasta 60% de su biomasa total después del aprovechamiento (Roxburgh, Wood, Mackey, Woldendorp y Gibbons, 2006).

Intervenciones silvícolas como la apertura de espacios son herramientas para controlar la densidad. Factores como la calidad del sitio, exposición, condiciones climáticas, degradación y disponibilidad de nutrientes modifican los patrones de partición y contenido de biomasa; los cambios en acumulación de biomasa, y en consecuencia C, pueden ser resultado de actividades humanas (Schroeder, Brown, Birdsey, Mo, Birdsey y Cieszewsky, 1997; Wang, Hawkins y Letchford, 1998; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011b).

Ixtlán de Juárez se ubica en la región Sierra Norte del estado de Oaxaca, México, donde los ecosistemas de



pino-encino son de gran importancia ecológica, económica y social. Para el aprovechamiento sustentable del bosque se han aplicado tratamientos silvícolas como cortas selectivas y/o aclareos y cortas de regeneración mediante árboles padres (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). Este último método consiste en dejar 28 árboles ha^{-1} a 35 árboles ha^{-1} , que sean los mejores individuos que producirán semillas para asegurar ocurra la regeneración de una nueva generación de arbolado. Y a partir de 2004, en otros rodales se aplicó el tratamiento de matarrasa en franjas alternas que consiste en la remoción total del arbolado en franjas de entre 30 m y 40 m de ancho (STF, 2014).

En la comunidad de Ixtlán se han aplicado tratamientos silvícolas desde el año 1993 con la finalidad de manejar la estructura de la masa forestal; con la apertura de claros se propician las condiciones adecuadas para dar origen a una composición de especies más balanceada entre elementos de género *Pinus* sp., *Quercus* sp., latifoliadas, arbustos y herbáceas en cada subrodal bajo manejo. Además, la apertura de espacios favorece a especies intolerantes como el caso de *Pinus oaxacana* Mirov. Las prácticas silvícolas favorecen la concentración de biomasa en los diferentes estratos arbóreos en los subrodales y su estructura puede modificarse a través de las cortas intermedias.

Pinus oaxacana Mirov se distribuye desde El Salvador y Honduras hasta México, en altitudes entre 1500 m y 3200 m; se presenta en hábitats cálidos, templado húmedos, áridos, y de suelos profundos hasta arenosos y gravosos (Alba-Landa, Mendizábal-Hernández y Márquez, 2001). En la región Sierra Norte, esta especie se registra con aprovechamiento forestal maderable significativo, mayor distribución y abundancia (Álvarez y Rubio, 2013). Por esta razón es importante estudiar los compartimentos de biomasa aérea en sus rodales manejados.

OBJETIVOS

a) Obtener modelos alométricos para estimar biomasa aérea de *Pinus oaxacana* Mirov y mezcla de especies asociadas; y b) evaluar el efecto de tratamientos silvícolas de

árboles padres y matarrasa en franjas alternas en los compartimentos de biomasa aérea de rodales de esta especie en Ixtlán, Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes del área de estudio

Durante 2014 se ubicaron de manera dirigida 12 unidades muestrales (UM) de 400 m^2 en terrenos comunales de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, comunidad con vocación y potencial de aprovechamiento forestal maderable comercial al sur de México. Los sitios se localizan en terrenos con pendientes entre 10% y 60%, a una altitud promedio de 2350 m, entre las coordenadas 17° 19'53.539"–17° 21'52.075" N, y 96° 27'34.747" – 96° 29'31.622" O (Fig. 1).

Los sitios de forma circular, de 400 m^2 , se establecieron en campo con ayuda de GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA) haciendo la compensación por pendiente. En cada UM se realizó inventario total para árboles de diámetro normal (DN) ≥ 10 cm y arbustos, obteniendo: DN (cm), diámetro de base (DB, cm) medidos con cinta diamétrica (Jackson, MS 800-647-5368) y altura total (AT, m) obtenida con clinómetro Suunto (PM-5 360 PC).

Las UM se establecieron en tres sistemas silvícolas en sitios que presentaban variación en manejo: 1) árboles padres con regeneración >15 años (AP+R15) y 2) regeneración <10 años (AP+R10); 3) matarrasa en franjas alternas (aplicado en 2004 y la regeneración de siete años de edad) y, 4) el conservado (tratamiento testigo). De cada variante de manejo silvícola se tuvieron tres repeticiones bajo un diseño completamente aleatorizado. Los sitios conservan un balance adecuado en composición de especies arbóreas, conteniendo: *Pinus oaxacana*, *Pinus teocote* Schlecht & Cham, *Quercus rugosa* Née, *Q. laurina* Humb et Bonpl, *Arbutus xalapensis* Kunth, *Clethra mexicana* DC., *C. lanata* M. Martens & Galeotti y *Alnus acuminata* Kunth. En los sitios donde se aplicó el tratamiento de árboles padres AP+R10 y AP+R15, se logró que la regeneración tuviera respectivamente 2892 árboles ha^{-1} y 1533 árboles ha^{-1} , mientras que en los sitios en que se aplicó

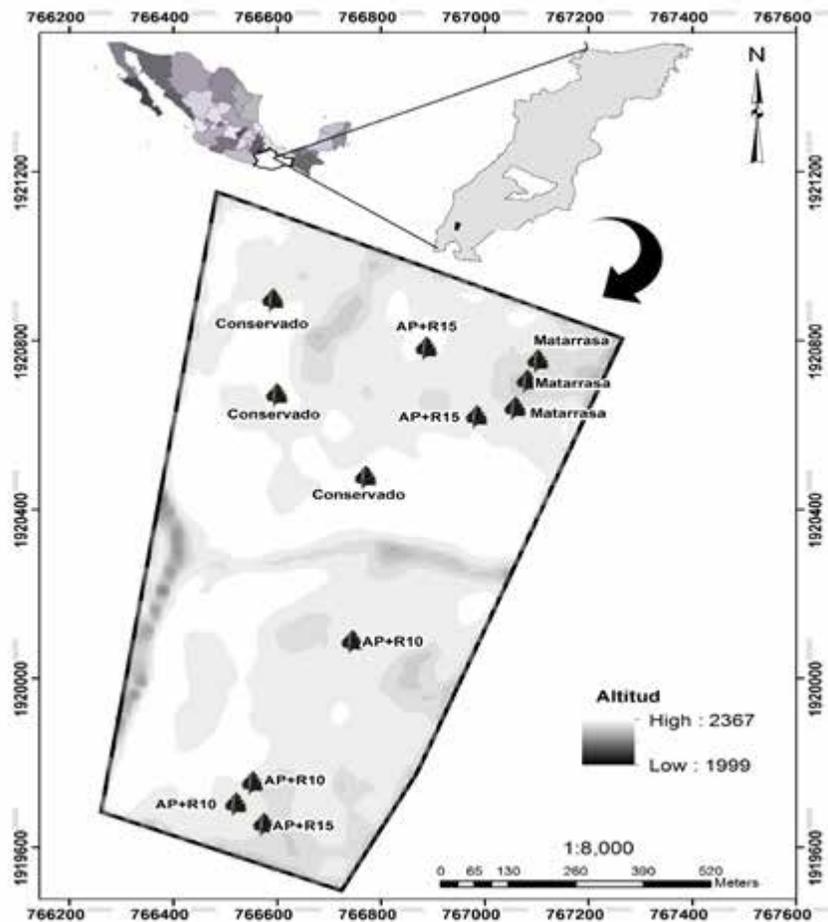


FIGURA 1. Sistemas silvícolas evaluados en rodales de *Pinus oaxacana* en Ixtlán, Oaxaca, México. AP+R10 y AP+R15 = árboles padres con regeneración <10 y >15 años.

matarrasa, en la regeneración se establecieron 2475 árboles ha^{-1} de siete años de edad. En el sitio de conservación, no intervenido, se tenían 1525 árboles de *Pinus oaxacana* por hectárea, que tenían en promedio 52 años de edad, 22 m de altura y 27 cm de DN.

Determinación de los contenidos de biomasa por compartimento

Mediante muestreo destructivo se tomaron datos de un total de 69 ejemplares, de los cuales 35 correspondieron a *P. oaxacana* y 34 fueron individuos de porte arbustivo de especies asociadas, mismas que fueron obtenidas de los sitios de estudio y distribuidas de manera aleatoria y proporcional a la frecuencia de las categorías de diámetro y

especie, respectivamente. Las categorías diamétricas comerciales involucradas fueron entre 15 cm y 55 cm y, al igual que las especies, se tomó como submuestra entre 5% y 8% del total de cada grupo. Después de que los individuos se derribaron con motosierra Stihl (MS210, Alemania) la biomasa aérea se estimó mediante la metodología de Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012).

En la mezcla de especies arbustivas se desarrollaron modelos alternos de estimación de biomasa en ramas y hojas de forma individual, que se utilizaron para integrar la biomasa de los compartimentos a escala árbol.

$$B_{rama} = 0.1394 \times (Dram)^{1.4844} \times (Secc)^{-0.0825}$$



$$B_{\text{hoja}} = 0.0192 \times (\text{Dram})^{0.8335} \times (\text{Ar})^{0.3946}$$

Donde: $B_{\text{rama, hoja}}$ = biomasa de ramas y hojas (kg), Dram = diámetro basal de la rama (cm), Secc = sección de copa a la que pertenece la rama, Ar = altura de inserción de la rama en el fuste (m). Ambos modelos mostraron, respectivamente, coeficientes de determinación ajustados (R^2_{Adj}) de 0.56 y 0.48 y cuadrados medios de error de 0.54 y 0.007 para ramas y hojas con significancia estadística $p < 0.01$. En los modelos se consideraron estas variables ya que están directamente relacionadas con el modelo de tuberías, que indica que el área de tejido vivo de la rama (albura) está directamente relacionado con la biomasa foliar y maderable que soporta (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012).

En cada UM, la necromasa se cuantificó en una subparcela de 25 m² y dos subparcelas de 1 m² para muestrear herbáceas y mantillo (dividido en hojarasca y humus). De cada subparcela se extrajo el total de biomasa fresca para obtener peso fresco (PF, kg) en báscula Torrey serie EQB/EQM Houston, TX, USA; una muestra de 100 g aproximadamente fue guardada en una bolsa de papel e identificada con la finalidad de determinar PF y peso seco (PS, kg) después de secado a temperatura entre 75 °C y 100 °C en estufa (Memmert modelo 100-800, Alemania) en laboratorio. La biomasa total de cada componente se obtuvo mediante factores de conversión (PS/PF).

Análisis estadístico de datos

Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004), comprobando los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk (procedimiento UNIVARIATE) y Bartlett (Correa, Iral y Rojas, 2006), respectivamente. Debido a la alta variabilidad en los datos de biomasa de los compartimentos evaluados fue necesaria la transformación a $\text{Log}(x)$. Los datos fueron evaluados mediante análisis de varianza (PROC ANOVA) y prueba de separación de medias (Duncan, 0.05) bajo un diseño completamente aleatorizado. Los modelos alométricos de biomasa fueron ajustados mediante el procedimiento MODEL. Se

realizó análisis clúster para clasificar los sitios de muestreo en los tratamientos silvícolas, con base en los contenidos de biomasa aérea.

RESULTADOS

Modelos alométricos para estimar biomasa arbórea y arbustiva

La aplicación de tratamientos silvícolas permite incrementar la productividad de manera sustentable, expresada en cantidad de biomasa concentrada en la especie y la parte de importancia económica.

Para *P. oaxacana* las ecuaciones que estiman los compartimentos de biomasa aérea y que mostraron mejor bondad de ajuste y estimadores estadísticos confiables fueron de tipo lineal. En la ecuación de biomasa en hojas (B_h) el parámetro β_0 no fue significativo ($p > 0.05$), sin embargo, es necesario en el modelo como factor de ajuste. En el resto de los parámetros de predicción en los modelos alométricos de los compartimentos se observó significancia ($p \leq 0.0015$) (Tabla 1).

Los modelos propuestos para la estimación de estos componentes aéreos de biomasa fueron los de mejor ajuste, ya que presentaron parámetros estadísticos significativos ($\alpha = 0.05$) y errores estándar pequeños. La biomasa de tallo+corteza (B_t) y de ramas (B_r) se estimó en función de DN y AT bajo el modelo de la variable combinada generalizada; las variables involucradas en el modelo predicen 97% y 93% de la variabilidad existente en la biomasa de esos compartimentos respectivos. La variabilidad de biomasa en hojas (B_h) se puede predecir en 98%, utilizando diámetro normal y altura del árbol en un modelo lineal mezclado (Tabla 1).

Los parámetros involucrados para estimar biomasa total aérea (B_t) no mostraron significancia estadística ($p \geq 0.08$) en la prueba de t; sin embargo, la ecuación tuvo $R^2_{\text{adj}} = 0.97$, indicativo de su alta bondad de ajuste bajo un modelo no lineal utilizando variables de fácil medición. La biomasa aérea de arbustos asociados (B_{arbusto}) que incluyó *P. teocote*, *Alnus acuminata*, *Quercus rugosa*, y *Q. laurina*, tomó en cuenta diámetro basal (DB) y altura

de los individuos, logrando una estimación de 88% con el modelo lineal combinado, a pesar de tratarse de mezcla de especies. En este caso, todos sus parámetros fueron significativos ($p \leq 0.03$) y con bajo error estándar (Tabla 2).

Biomasa aérea en sitios bajo tratamientos silvícolas

Los tratamientos silvícolas mostraron igualdad en los contenidos de biomasa en los compartimentos herbáceo, hojarasca y humus ($p \geq 0.1$); por otro lado, la biomasa contenida en necromasa, arbustivo y arbóreo fue diferente en los tratamientos evaluados ($p \leq 0.05$). Las franjas a matarrasa almacenan la mayor cantidad de materia muerta ($22.25 \text{ t ha}^{-1} \pm 4.85 \text{ t ha}^{-1}$), debido a que en su instalación se incorporó el material siguiendo las curvas de nivel para reducir los impactos de erosión. Este tratamiento silvícola contiene la menor cantidad de biomasa en especies arbustivas asociadas ($1.29 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.67 \text{ t ha}^{-1}$). Los compartimentos específicos de *P. oaxacana* se concentran, por lo general, en los tratamientos AP+R10 que igua-

lan la cantidad de biomasa contenida en sitios bajo conservación (Tabla 3).

En algunos compartimentos donde no se detectaron diferencias estadísticas a pesar que la media de tratamientos es diferente (herbáceas y humus) se mostró la mayor variabilidad, alcanzando la desviación estándar más de 50% del valor de la media (Tabla 3). Este problema de inflación de varianzas se presentó en todos los compartimentos de biomasa, por lo que fue necesario transformar las variables y utilizar una prueba de medias de menor rigurosidad.

Todos los compartimentos presentaron diferencias de biomasa acumulada en los tratamientos silvícolas ($p \leq 0.05$); la mayor cantidad de biomasa aérea de *P. oaxacana* se presentó en el tratamiento AP+R10 que contiene la mayor densidad ($2892 \text{ árboles ha}^{-1}$) y la menor cantidad de biomasa en el piso forestal (Tabla 4).

Al igual que el compartimento de sotobosque, la biomasa contenida en el total aéreo de estos rodales manejados se concentra mayormente en el tratamiento

TABLA 1. Parámetros estimados, errores estándar y valores de t para modelos que estiman biomasa de compartimentos aéreos de *Pinus oaxacana*.

Ecuación/Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para H_0 parámetro=0	Prob > t
$B_r = \beta_0 + \beta_1(DN)^2 - \beta_2(AT) - \beta_3(DN^2 \times AT) \dots R^2 = 0.93$					
Ordenada al origen	β_0	1.049	0.277	3.79	0.0001
DN	β_1	0.012	0.001	0.57	0.0001
AT	β_2	-0.144	0.025	-5.73	0.0001
$(DN^2 \times AT)$	β_3	-0.00028	0.00002	-9.58	0.0001
$B_n = \beta_0 + \beta_1(DN_2 \times AT) \dots R^2 = 0.98$					
Ordenada al origen	β_0	0.005	0.002	2.75	0.1030
$(DN^2 \times AT)$	β_1	0.000002	0.00000005	38.48	0.0001
$B_f = \beta_0 + \beta_1(DN)^2 - \beta_2(AT) - \beta_3(DN^2 \times AT) \dots R^2 = 0.97$					
Ordenada al origen	β_0	7.259	2.051	3.54	0.0015
DN	β_1	0.124	0.008	15.41	0.0001
AT	β_2	-0.979	0.186	-5.26	0.0001
$(DN^2 \times AT)$	β_3	-0.002	0.0002	-11.90	0.0001

$B_{r,n,f}$ = biomasa en ramas, hojas y fuste+corteza (t/kg/árbol), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), $\beta_{0,1,2,3}$ = parámetros de regresión.



TABLA 2. Componentes de los modelos de estimación de biomasa total aérea (kg/árbol) de *Pinus oaxacana* (B_t) y arbustos asociados (B_{arbusto}).

Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para HO parámetro=0	Prob > t
$B_t = 0.108919 \times DN^{1.26323} \times AT^{1.235934} \dots R^2_{\text{adj}} = 0.97$					
Ordenada al origen	β_0	0.1089	0.1745	0.62	0.53
DN	β_1	1.2632	0.7011	61.80	0.08
AT	β_2	1.2359	0.1516	1.07	0.29
$\text{Barbusto} = \beta_1(DB) - \beta_2(DB)^2 - \beta_3(AT) + \beta_4(DB \times AT) \dots R^2 = 0.88$					
DB	β_1	3.054	1.36	2.24	0.034
DB ²	β_2	-0.27	0.12	-2.28	0.031
AT	β_3	-4.9	2.16	2.26	0.032
DB×AT	β_4	0.62	0.20	3.08	0.005

DN = diámetro normal (cm), DB = diámetro basal (cm), AT = altura total (m). $\beta_{0,1,2,3,4}$ = parámetros de regresión, R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado.

TABLA 3. Compartimentos específicos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo manejo forestal.

Compartimento de biomasa (t ha ⁻¹ /Prob. [§])	Tratamiento silvícola			
	AP+R10	AP+R15	Matarrasa	Conservado
Herbáceo (0.4)	1.42 ± 0.73 a	0.68 ± 0.39 a	4.19 ± 3.9 a	1.19 ± 0.49 a
Hojarasca (0.2)	8.38 ± 0.90 a	9.46 ± 4.33 a	4.14 ± 1.27 a	8.41 ± 5.96 a
Humus (0.1)	17.56 ± 3.49 a	20.53 ± 11.97 a	10.13 ± 3.67 a	22.53 ± 6.06 a
Necromasa (0.05)	6.62 ± 1.84 b	11.02 ± 12.34 ab	22.25 ± 4.85 a	13.45 ± 0.44 ab
Arbustivo (0.001)	42.27 ± 31.41 a	20.03 ± 8.43 ab	1.29 ± 0.67 b	19.47 ± 14.35 ab
Árboreo tallo [¶] (0.002)	50.74 ± 19.11 a	10.78 ± 8.02 b	5.49 ± 2.92 b	55.07 ± 23.40 a
Árboreo rama [¶] (0.05)	2.06 ± 0.44 a	0.66 ± 0.57 a	2.48 ± 1.64 a	2.02 ± 0.97 a
Árboreo hoja [¶] (0.01)	0.02 ± 0.008 a	0.005 ± 0.004 b	0.01 ± 0.008 ab	0.03 ± 0.01 a

AP+R10, AP+R15 = árboles padres con regeneración <10 años y >15 años. [§]Valores transformados a log(x), [¶]Compartimentos de biomasa aérea para *Pinus oaxacana*, incluyendo árboles y arbustos+corteza. Letras distintas en hileras indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). La media se incluye ± desviación estándar.

AP+R10 (129.41 t ha⁻¹ ± 41.9 t ha⁻¹) y la menor proporción en sitios bajo matarrasa en franjas (50.01 t ha⁻¹ ± 6.7 t ha⁻¹) (Tabla 4). La intervención aplicada recientemente (2004) en las franjas a matarrasa asocia estos sitios al contener cantidades similares de biomasa total aérea; por otro lado, intervenciones sucedidas en tratamientos de árboles padres contienen por lo general, cantidades similares de biomasa total que los sitios bajo conservación (Fig. 2).

DISCUSIÓN

Biomasa en estrato arbóreo-arbustivo

La biomasa total aérea contenida en los rodales de *Pinus oaxacana* bajo manejo se concentra mayormente en los tratamientos de árboles padres con regeneración <10 años y en sitios bajo conservación, con un promedio de 127.58 t ha⁻¹; estos resultados demuestran que los tratamientos silvícolas aplicados al bosque afectan considerablemente

TABLA 4. Biomasa aérea en *Pinus oaxacana*, piso forestal y sotobosque de rodales bajo tratamientos silvícolas en Ixtlán, Oaxaca.

Biomasa en compartimentos (t ha ⁻¹ /Prob. ^g)	Tratamiento silvícola			
	AP+RIO	AP+RI5	Matarrasa	Conservado
Total aéreo para <i>Pinus oaxacana</i> (0.003)	55.94 ± 20.9 a	11.46 ± 8.8 b	7.99 ± 4.2 b	60.67 ± 25.8 a
Piso forestal ^h (0.05)	29.78 ± 2.9 b	41.02 ± 9.8 ab	36.56 ± 2.4 ab	44.40 ± 1.8 a
Sotobosque ^h (0.02)	43.69 ± 32.0 a	20.71 ± 8.0 ab	5.46 ± 4.1 b	20.67 ± 14.5 ab
Total aéreo ^f (0.005)	129.41 ± 41.9 a	73.19 ± 10.1 ab	50.01 ± 6.7 b	125.74 ± 38.8 a
Densidad (árb ha ⁻¹)	2892	1533	2475	1525

AP+RIO, AP+RI5 = árboles padres con regeneración <10 años y >15 años. ^gValores transformados a log(x). ^hIncluye compartimentos de hojarasca, humus y necromasa. ⁱIncluye compartimento herbáceo y arbustivo, excepto de *Pinus oaxacana*. ^fIncluye todos los compartimentos aéreos. Letras distintas en hileras indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). La media se incluye ± desviación estándar.

la acumulación de biomasa aérea por unidad de superficie, ya que a partir de la corta de regeneración, los nuevos árboles en su etapa juvenil presentan individualmente mayor velocidad de crecimiento que árboles de mayor edad que se encuentran en los sitios conservados. En los sitios, la densidad, edad y dimensiones de los árboles de estos tratamientos respectivos determinan la intensidad de acumulación y cantidad de biomasa aérea. Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011a) mencionan que los tratamientos silvícolas afectan la acumulación de biomasa a escala árbol, pues posterior al aclareo se crean condiciones de menor competencia para el árbol por agua, nutrientes y radiación solar, promoviendo así mayores tasas de fotosíntesis neta y acumulación individual de biomasa. Sin embargo, al haber eliminado arbolado, la biomasa en pie disminuye a escala rodal, mientras que en rodales sin manejo la acumulación de biomasa aumenta pero disminuye a escala árbol, esto atribuido a la densidad arbórea. En los sitios en conservación, dos situaciones podrían ser la causa de la baja acumulación de biomasa: 1) la edad más avanzada del arbolado, que ya muestra reducción de sus tasas de crecimiento; 2) el arbolado se encuentra sometido a mayor competencia.

Estos mismos tratamientos concentran mayor biomasa en los compartimentos aéreos de *P. oaxacana*, promediando 58.3 t ha⁻¹ (Tabla 4), permitiendo estimar de manera individual la biomasa de árboles y arbustos de esta especie utilizando modelos lineales en su estructura

de variable combinada generalizada y modificada. Al añadir en la estructura de estos modelos variables como diámetro (DN) y altura (AT) se aumenta la bondad de ajuste, tal como lo indican Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012) que ajustaron modelos en masas puras de *Pinus patula* Schl. *et* Cham en la misma comunidad. Sanquetta, Watzlawick, Arce y De Mello (2001) mencionan que en ocasiones las variables DN y AT reflejan una baja correlación, por lo tanto el ajuste de los modelos puede ser bajo, cosa que no sucedió en el presente estudio.

Por otro lado, autores como Nívar, González y Graciano (2001), en cinco especies del género *Pinus* obtuvieron R² bajos en modelos para estimar biomasa foliar y de ramas con un promedio de 38% y 66%, respectivamente; en el componente de biomasa en hojas y ramas, Gayoso y Schlegel (2001) señalan R² = 26.3% en *Pinus radiata* D. Don. En *Pinus greggii* Engelm. de seis años esta proporción parece diferir para ramas y hojas (R² = 49.0%) (Pacheco *et al.*, 2007). La variabilidad de diámetros por los crecimientos diferentes de especies en comparación con las plantaciones puede ocasionar ajustes bajos para estos componentes (Fonseca, Alice y Rey, 2009). En contraposición, los modelos generados muestran estimaciones entre 93% y 98% para los componentes individuales de ramas, tallo+corteza y hojas de *P. oaxacana*, a pesar de tratarse de mezcla de árboles y arbustos; inclusive el modelo que estima biomasa de arbustos asociados mostró R² = 0.88.

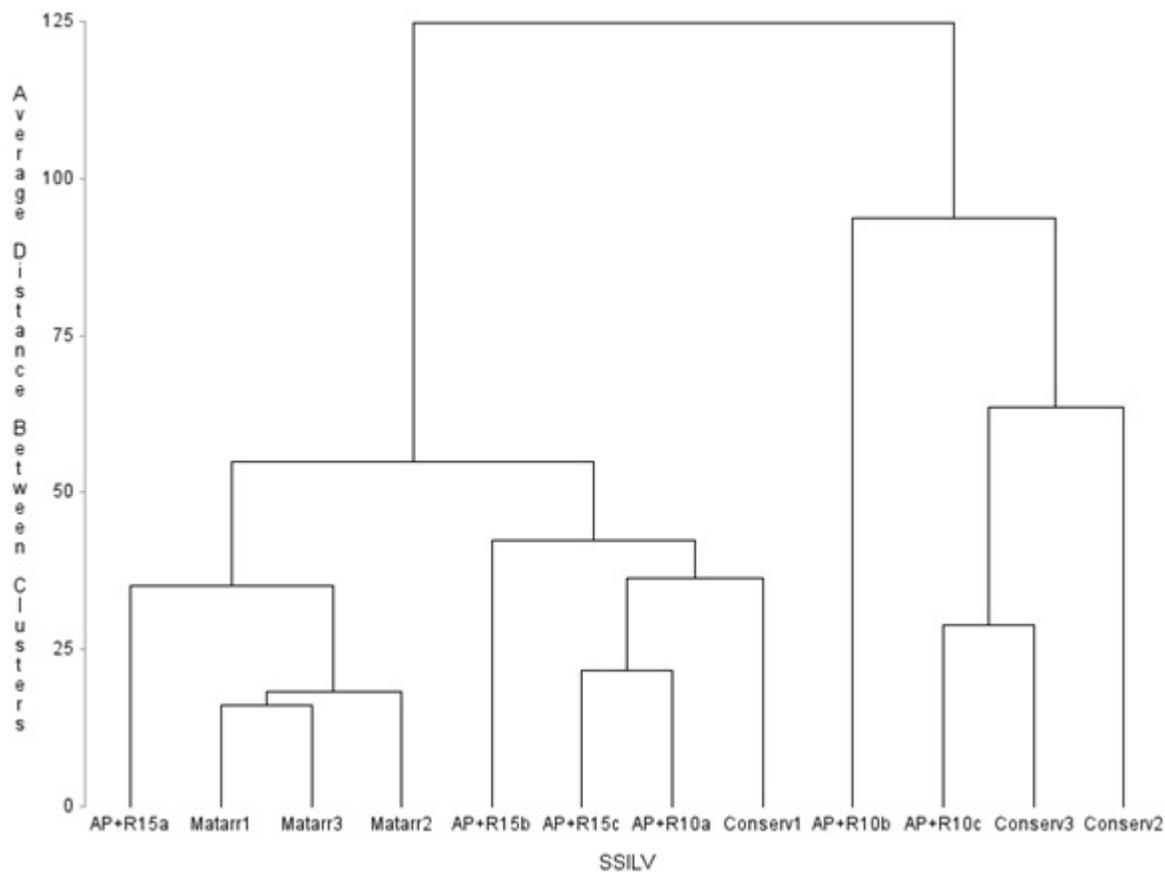


FIGURA 2. Clasificación de los sistemas silvícolas (SSILV) evaluados y sus repeticiones (a, b, c, 1, 2, 3) de acuerdo con los contenidos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana*. AP+R10, AP+R15 = árboles padres con regeneración <10 y >15 años. Matarr = matarrasa en franjas alternas. Conserv = sitios sin tratamiento silvícola.

En similitud, para *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Sénéclauze), Barret y Golfari, Vidal, Benítez, Rodríguez, Carlos y Gra (2004) encontraron $R^2 = 0.90$ en biomasa foliar y 0.89 en ramas; al igual que los obtenidos por Flores-Nieves, López-López, Ángeles-Pérez, Isla-Serrano y Calva-Vásquez (2011) en *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.). Estos últimos también analizaron datos de masas puras, pero únicamente del estrato arbóreo, mientras que en el presente trabajo se incluyó al estrato arbóreo y arbustivo con una diversidad de alrededor de siete especies diferentes; además de abarcar condiciones de desarrollo y crecimiento diferentes en los tratamientos silvícolas, alcanzando incluso niveles de autoaclareo (tratamiento en conservación y AP+R15).

Para el caso de los modelos de acumulación se encontró una relación intrínseca entre las variables medidas en campo (DN y AT), las cuales mostraron alta significancia ($p = 0.0001$) para predecir biomasa en tallo+corteza y biomasa total en el estrato arbóreo y arbustivo. Estos ecuaciones alométricas mostraron la mejor bondad de ajuste para estos compartimentos, con un $R^2_{adj} = 0.97$ y $R^2 = 0.88$, respectivamente (Tabla 2). La estructura de estos modelos es similar a los desarrollados por Chávez-Pascual et al. (2013) para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen., quienes registraron valores de $R^2_{adj} = 0.95$; en general, al adicionar AT al DN en las ecuaciones se obtienen, como en este caso, mejores predicciones de biomasa en tallo+corteza y total aéreo. Estos resultados coinciden con

Zianis y Mencuccini (2003) y Figueroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez y De los Santos-Posadas (2010) que en *Pinus patula* en Hidalgo en un bosque bajo manejo forestal, encontraron $R^2 = 0.97$ para estimar biomasa en Durango.

Pimienta, Cabrera, Aguirre, Hernández y Jiménez (2007) añadieron como variable predictora la densidad básica de la madera y ajustó modelos para *Pinus cooperi* Blanco con $R^2 = 0.96$. Sanquetta *et al.* (2001) ajustó modelos con un $R^2 = 0.89$ en pino utilizando solamente DN como variable predictora. El mismo modelo para *Pinus patula* mostró $R^2 = 0.98$, al igual que para *Pinus pseudostrobus* Lindl. var *pseudostrobus* y *teocote* Schiede ex Schldl. en el sur de Nuevo León (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Domínguez-Cabrera, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Rodríguez-Laguna y Díaz-Balderas, 2009). Por tal motivo, los modelos generados en esta investigación predicen confiablemente la biomasa de los compartimentos aéreos específicos y acumulado total para la especie en estudio; debido a que utilizan variables típicas de inventario pueden ser aplicados a las condiciones de esta comunidad y otras regiones que posean condiciones similares de manejo, altitud, climáticas y edáficas.

Por otra parte, Fonseca *et al.* (2009) obtuvieron $R^2_{adj} = 0.82$ con el DN como única variable para estimar biomasa en plantaciones y bosques secundarios en Costa Rica; mientras que en Oaxaca, Acosta-Mireles *et al.* (2002) encontraron valores de R^2 entre 0.97 y 0.99 usando solamente DN para especies como *Liquidambar*, *Rapanea*, *Quercus* y *Clethra*, al igual que Deans, Mora y Grace (1996) en especies tropicales. Valores bajos en la confiabilidad y bondad de ajuste del modelo indican que es necesario añadir la AT como variable predictora, ya que los modelos generados en este trabajo estimaron confiablemente la biomasa con las dos variables ya mencionadas.

Los modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono ayudan a estimar el almacenamiento de C en sistemas forestales y agroforestales y en diversas especies arbóreas; las relaciones de biomasa total se desarrollan de mejor manera con modelos de regresión no lineal (Schroeder *et al.*, 1997; Segura y Andrade, 2008; Rodríguez-Ortiz

et al., 2012), tal como el modelo generado para estimar la biomasa total aérea de *P. oaxacana*, que presentó los mejores estimadores estadísticos.

Biomasa en otros compartimentos aéreos

La proliferación de herbáceas dentro de la población objeto de estudio se debe en gran parte a los métodos silvícolas utilizados en la comunidad de Ixtlán (árboles padres o individuales y matarrasas) (Ruíz-Aquino *et al.*, 2014), lo que ocasiona la apertura de espacios en el dosel y favorece la entrada de luz, que permite la acumulación de biomasa en herbáceas y arbustos.

Por tal razón, se observó mayor cantidad de biomasa de herbáceas y mayor variabilidad ($4.19 \text{ t ha}^{-1} \pm 3.9 \text{ t ha}^{-1}$, que no permitió detectar diferencias) en el tratamiento de franjas a matarrasa (Tabla 3), donde la entrada de luz es más intensa ya que el dosel arbóreo es abierto por las características ya mencionadas del sistema silvícola. Aunado a esto, la edad de la regeneración es de 7 años \pm 3 años, presentando una de las mayores densidades, 2475 individuos ha^{-1} (Tabla 4), al igual que el tratamiento bajo árboles padres (AP+R10) que mostró mayor acumulación de herbáceas que el bosque bajo conservación, ya que la regeneración aún es muy pequeña y los claros permiten la entrada de luz en buena cantidad al suelo (Pallavacini, 2010).

El tratamiento testigo (sitios conservados) presentó características de un bosque abierto y menor densidad ($1525 \text{ árboles ha}^{-1}$), pero de individuos con mayores dimensiones, lo que limita la iluminación y el crecimiento de herbáceas y arbustivas, contrario al tratamiento AP+R10, donde se alcanzó la mayor cantidad de biomasa en sotobosque (43.69 t ha^{-1}) y donde las herbáceas solo incorporan en promedio 1.42 t ha^{-1} (Tablas 3 y 4) (Parker, Douglas y Morneault, 2012).

Estos resultados concuerdan con Herrera, del Valle y Alonso (2001) quienes encontraron mayores acumulaciones de biomasa en herbáceas en bosques secundarios (0.919 t ha^{-1}), mientras que el bosque primario mostró menor promedio (0.627 t ha^{-1}). Autores como Plevich, Nuñez, Cantero, Dmaestri y Viale (2002), realizaron un estudio similar en bosques de *Pinus elliotii* (Engelm) bajo



diferentes intensidades de aclareo en Argentina, mostrando que, a mayor intensidad de corta, existe una mayor aparición de herbáceas por la apertura de espacios aéreos que en el tratamiento testigo sin aclareo. Otro factor que actúa en la germinación de herbáceas es la cantidad de acículas existentes en el piso forestal, donde las gramíneas se establecen con mayor frecuencia al abrir espacios por diversas actividades antropogénicas en los bosques (Pallavacini, 2010). Marable-García y Álvarez-Taboada (2014) hallaron valores de 0.036 t ha^{-1} estimando biomasa de herbáceas a partir de datos hiperespectrales, utilizando análisis de datos mediante el software ViewSpecPro en Madrid, España. Estos resultados son inferiores incluso a los encontrados en el tratamiento AP+R15 de menos presencia de herbáceas (0.68 t ha^{-1}) y destacando que este compartimento presenta una correlación significativa ($p < 0.05$) con la densidad residual.

En el componente piso forestal, que comprende hojarasca y humus, existe una relación intrínseca con la densidad manejada por el sistema silvícola; en este caso, la menor acumulación de biomasa en el piso forestal se encontró en AP+R10 ($32.57 \text{ t ha}^{-1} \pm 2.9 \text{ t ha}^{-1}$) y la mayor, en sitios conservados ($44.4 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.8 \text{ t ha}^{-1}$). Esto se puede atribuir al manejo silvícola aplicado, ya que la regeneración joven presenta tasas mayores de formación de ramas y hojas en relación con su senescencia y caída, mientras que para los árboles de mayor edad en un rodal conservado la formación de nuevas estructuras y la senescencia de otras pueden estar casi igualadas; de esta manera, los tratamientos silvícolas aplicados influyen en la cantidad de hojarasca y humus contenida en el piso forestal (Moran, Barker, Moran, Becker y Ross, 2000; Herrera *et al.*, 2001).

Para el caso de biomasa en el piso forestal, Gómez-Díaz *et al.* (2011) encontraron diferencias significativas y valores de 7.7 t ha^{-1} hasta 10.2 t ha^{-1} de hojarasca, el promedio más alto en un bosque maduro y el menor en un bosque secundario medio, y 7.0 t ha^{-1} a 21.7 t ha^{-1} de humus en tres condiciones de bosque tropical. Estos valores son semejantes a los generados en el presente estudio.

En el mismo sentido, las cantidades acumuladas de humus están influenciadas por la cantidad de luz que entra al piso forestal, lo que contribuye a la rápida transición de hojarasca a humus. Este fenómeno probablemente se presentó en los tratamientos bajo conservación y matarrasa, donde se observó la mayor cantidad de biomasa en el piso forestal (Tabla 4), la cual también está influenciada por la gran cantidad de material vegetal que se dejó sobre el suelo al momento de la corta final de la vegetación (matarrasa). En el tratamiento AP+R10 se observó la menor cantidad de hojarasca y humus, por la mayor densidad arbórea y la menor cantidad de luz que llega al piso forestal (Wagner, Little, Richardson y McNabb, 2006).

Para el caso de la necromasa, las cantidades promedio encontradas se pueden relacionar con la composición arbórea y el tratamiento silvícola aplicado; ya que los tratamientos con mayor antigüedad (AP+R15) y los sitios conservados presentan un primer estrato arbóreo compuesto por árboles viejos o jóvenes con alta densidad. Estos presentan podas naturales así como caída de árboles completos, por la misma razón presentan mayor acumulación de necromasa en densidades residuales altas (Chao, Phillips y Baker, 2008; Araujo-Murakami *et al.*, 2011). En contraparte, en el tratamiento de matarrasa (de mayor acumulación de necromasa que el tratamiento AP+R10) el estrato es similar en toda la franja, solo hay caída de ramas de franjas alternas contiguas sin manejo. Esto concuerda con Herrera *et al.* (2001), quienes mencionan que las condiciones de manejo en el bosque determinan la cantidad de biomasa en necromasa existente.

El contenido total de biomasa aérea en los rodales manejados de Ixtlán arrojó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos silvícolas, mostrando mayor acumulación en biomasa total aérea en AP+R10 y sitios conservados, que los sitios bajo matarrasa. Estos resultados implican que los tratamientos silvícolas con diferentes intensidades de corta influyen de manera directa en la acumulación de biomasa aérea en los rodales bajo manejo forestal; con las intervenciones silvícolas posteriores a la extracción se pueden aumentar estos promedios. En este punto radica la importancia del buen

manejo para potenciar y optimizar la fijación de C en biomasa (Wang *et al.*, 1998).

CONCLUSIONES

Los modelos ajustados para estimar biomasa aérea de individuos de porte arbóreo y arbustivo de *Pinus oaxacana* y especies arbustivas asociadas son una herramienta muy importante para cuantificar la biomasa parcial y total de compartimentos de rodales bajo manejo forestal y conservación. El uso de variables de fácil medición (diámetro y altura) permite estimar la biomasa aérea de forma precisa en datos de inventario. Los tratamientos silvícolas aplicados a los rodales de *P. oaxacana* afectan la biomasa aérea acumulada en los compartimentos específicos y totales de la especie, así como la biomasa contenida en el piso forestal, sotobosque y total aéreo. Sin embargo, los rodales manejados bajo tratamientos de árboles padres de edades de 10 años y 15 años igualan la productividad de biomasa total aérea que el bosque bajo conservación.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, A., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A. y Etchevers-Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36, 725-736.
- Alba-Landa, J., Mendizábal-Hernández, L. de. C. y Márquez, J. R. (2001). Comparación del potencial de producción de semillas de *Pinus oaxacana* Mirov. de dos cosechas en los Molinos, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 3(1), 35-38.
- Álvarez, S. y Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 125-137. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.01.005
- Araujo-Murakami, A., Parada, A. G., Terán, J. J., Baker, T. R., Feldpausch, T. R., Phillips, O.L. y Brienen, R. J. W. (2011). Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. *Revista Peruana de Biología*, 18(1), 113-118. doi: 10.15381/rpb.v18i1.155
- Ayala-López, R. S., De Jong-Bergsma, B. H. J. y Ramírez-Maldonado, H. (2001). Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 153-157.
- Barrio, A. M., Balboa, M. M. A., Castedo, D. F., Diéguez, A. U. y Álvarez, G. J. A. (2006). An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 223(1-3), 24-34. doi: 10.1016/j.foreco.2005.10.073
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M. y López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de *Pinus patula* bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51-63.
- Chao K. J., Phillips, O. L. y Baker, T. R. (2008). Wood density and stocks of coarse woody debris in a northwestern Amazonian landscape. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 38, 795-805.
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Enríquez-del Valle, J.R., Chávez-Servia, J. L. y Campos-Ángeles, G. V. (2013). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1273-1284.
- Correa, J. C., Iral, R. y Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, 29, 57-76.
- Dauber, E., Terán, J. y Guzmán, J. R. (2003). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 1-10.
- Deans, J., Mora, J. y Grace, J. (1996). Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management* 88(3), 215-225. doi: 10.1016/s0378-1127(96)03843-1
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., y Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alomé-



- tricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. doi: 10.21829/myb.2007.1311233
- Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Rodríguez-Laguna, R. y Díaz-Balderas, J. A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Ambientales y del Ambiente*, 15(1), 59-64.
- Eamus, D., McGuinness, K. y Burrows, W. (2000). *Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern territory and Western Australia* (Reporte técnico No. 5a). Australia: Australian Greenhouse Office.
- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., y De los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 106-112.
- Flores-Nieves, P., López-López, M. A., Ángeles-Pérez, G., Isla-Serrano, M. de L. y Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 10-20.
- Fonseca, G. W., Alice, F. G. y Rey, J. M. B. (2009). Modelos para estimar biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. doi: 10.4067/S0717-92002009000100006
- Gayoso, J. y Schlegel, B. (2001). Proyectos forestales para la mitigación de gases efecto invernadero. Una tarea pendiente. *Ambiente y Desarrollo*, 1, 41-49.
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A. y Etchevers-Barra, J. D. (2011). Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana*, 30, 2-12.
- Herrera A., M. A., del Valle J., I. y Alonso S., O. (2001). Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. En Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. p. 18.
- Jandl, R., Linder, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K. y Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253-268. doi:10.1016/j.geoderma.2006.09.003
- Kimble, J. M., Lal, R. y Follett, R. F. (2002). *Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. Lewis Publishers, USA. 512 p.
- Marable-García, M. y Álvarez-Taboada, F. (2014). Estimación de biomasa en herbáceas a partir de datos hiperespectrales, regresión PLS y la transformación continuum removal. *Revista de Teledetección*, 42, 9-59.
- Montero, G., Muñoz, M., Donés, J. y Rojo, A. (2004). Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenacia* Willd. en los montes Pinar de Valsaín y Mata del Valsaín. *Investigación Agraria: Sistema de Recursos Forestales*, 13(2), 399-415.
- Moran, J. A., Barker, M. G., Moran, A. J., Becker, P. y Ross, S. M. (2000). A comparison of the soil water, nutrient status, and litterfall characteristics of tropical heath and mixed-dipterocarp forest sites in Brunei. *Biotropica*, 32, 2-13.
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257, 427-434. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Návar, J., González, N. y Graciano, J. (2001). Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Documento presentado en el Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.
- Pacheco E., F. C., Alderete, A., Gómez G., A., Fierros G., A., Cetina A., V. M. y Vaquera H., H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30, 251-254.
- Pallavacini, Y. (2010). Factores que influyen en la acumulación de biomasa de herbáceas durante la sucesión en minas de carbón. *Ecosistemas*, 19(3), 78-82.

- Parker, W. C., Douglas, G. P. y Morneault, A. E. (2012). Fluence of herbaceous and woody vegetation control on seedling microclimate, leaf gas exchange, water status, and nutrient relations of *Pinus strobus* L. seedlings planted in a shelterwood. *Forest Ecology and Management*, 271, 104–114. doi:10.1016/j.foreco.2012.01.042
- Pimienta de la T., D. de J., Cabrera, G. C., Aguirre, O. C., Hernández, F. J. y Jiménez, J. P. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 13(1), 35-46.
- Plevich, J., Núñez, C., Cantero, J., Dmaestri, M. y Viale, S. (2002). Biomasa del pastizal bajo diferentes densidades de pino (*Pinus elliottii*). *Agroforestería de las Américas*, 9, 33-34.
- Rodríguez-Ortiz, G., A. Aldrete, González-Hernández, V. A., De Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A. y Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45, 719-732.
- Rodríguez-Ortiz, G., De Los Santos-Posadas, H. M., Gonzales-Hernández, V. A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A. y Fierros-Gonzales, A. M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25-41.
- Rodríguez-Ortiz, G., González- Hernández, V. A., Aldrete, A., De Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A. y Fierros-González, A. M. (2011). Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 205-212.
- Roxburgh, S. H., Wood, S. W., Mackey, B. G., Woldendorp, G. y Gibbons, P. (2006). Assessing the carbon sequestration potential of managed forests: a case study from temperate Australia. *Journal of Applied Ecology*, 43, 1149-1159. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01221.x
- Ruíz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Rodríguez-Manzanares, A., y Fuentes-López, M. E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 20(2), 33-48.
- Sampaio E., Gasson, P., Bacarat, A., Cutler, D., Pareyn, F. y Costa-Lima, K. (2010). Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, 1135-1140. doi:10.1016/j.foreco.2009.12.028
- Sanquetta, R. C., Watzlawick, L. F., Arce, J. E. y De Mello, A. A. (2001). Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del estado de Paraná, Brasil. En Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. (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. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 24 p.
- Schroeder, P., Brown, S., Mo, J., Birdsey, R. y Cieszewsky, C. (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *Forest Science*, 43, 424-434.
- Schulp, C. J. E., Nabuurs, G. J., Verburg, P. H. y de Waal, R. W. (2008). Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 256, 482-490. doi: 10.1016/j.foreco.2008.05.007
- Segura, M, y Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96.
- Servicios Técnicos Forestales (2014). Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación de los recursos forestales maderables de Ixtlán de Juárez: ciclo de corta 2015-2024. Servicios Técnicos Forestales de Ixtlán de Juárez. Oaxaca, México. 364 p.
- Vidal, A., Benítez Y., J., Rodríguez, J., Carlos, R. y Gra, H. (2004). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var *caribaea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho Revista de Ciencias Forestales*, 11, 60-66.



- Wagner, R. G., Little, K. M., Richardson, B. y McNabb, K. (2006). The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests. *Forestry*, 79, 57-79.
- Wang, J. R., Hawkins, C. D. B. y Letchford, T. (1998). Relative growth rate and biomass allocation of paper birch (*Betula papyrifera*) populations under different soils moisture and nutrient regimes. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 44-55. doi: 10.1139/x97-191
- White, A., Cannel, M.G.R y Friend, A. D. (2000). CO2 stabilization, climate change and terrestrial carbon sink. *Global Change Biology*, 6(7), 817-833. doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00358.x
- Zianis, D. y Mencuccini, M. (2003). Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp. *Annual Forest Science*, 60, 439-448. doi: 10.1051/forest:2003036

Manuscrito recibido el 17 de septiembre de 2015.
Aceptado el 6 de junio de 2017.

Este documento se debe citar como:

Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A. y Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 23(3), 147-161. doi:10.21829/myb.2017.2331627