



Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa

Structural biomass and by compartments of *Pinus patula* regeneration in clearcutting sites

Gerardo Rodríguez-Ortiz^{1*}, Juan Ángel García-Aguilar¹, José Cristóbal Leyva-López¹, César Ruiz-Díaz¹, José Raymundo Enríquez-del Valle¹ y Wenceslao Santiago-García²

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

² Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

² Autor de correspondencia.
grodriguez.itvo@yahoo.com

RESUMEN

El cálculo de biomasa permite el conocimiento de procesos como movimiento de materia y energía, fijación y almacenamiento de carbono, entre otros. Por lo tanto, el objetivo fue analizar la distribución de la biomasa por componentes estructurales de *Pinus patula* en fase de vardascal, así como de los compartimentos en las áreas tratadas con matarrasa en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. En 2014 se ubicaron de forma dirigida nueve sitios de 400 m² cada uno, para realizar un inventario dasométrico y donde se realizó muestreo destructivo de 90 árboles en fase vardascal para obtener muestras de cada componente estructural; posteriormente se analizaron mediante regresión para estimar el contenido de biomasa por árbol y unidad de superficie. Se cuantificó la biomasa de otros compartimentos del sitio como necromasa, mantillo, arbustos y follaje caído. Se realizó un análisis de varianza y pruebas de medias (Tukey, 0.05) para observar diferencias en acumulación de biomasa de los compartimentos, utilizando como variable clasificatoria la densidad arbórea. Los modelos de regresión mostraron ajustes entre 0.79% y 97% por componente estructural y 97% en total árbol, al utilizar variables de fácil medición en campo (diámetro normal y altura total). La densidad alta recomendable (>1500 árboles ha⁻¹) presentó los mayores almacenes de biomasa en fuste (8048.3 kg ha⁻¹), ramas (141.3 kg ha⁻¹), hojas (146.2 kg ha⁻¹) y raíces (1350.0 kg ha⁻¹). El tratamiento silvícola matarrasa a los siete años de su aplicación favorece la regeneración del bosque con 11.91 t ha⁻¹ de biomasa distribuidos en diferentes compartimentos.

PALABRAS CLAVE: compartimentos de biomasa, densidad arbórea, Ixtlán de Juárez, modelos alométricos, muestreo destructivo.

ABSTRACT

Biomass measurements allows knowledge about processes like matter and energy movement, carbon sequestration and storage, among others. Therefore, the objective was to analyze the distribution of structural components of *Pinus patula* biomass in the green twig stage, as well as the compartments in clearcutting stripe sites at Ixtlán de Juárez, Oaxaca. In 2014, nine sites of 400 m² each were located using selective sampling and tree inventory was applied. Destructive sampling of 90 trees in the green twig stage was used in order to obtain samples of each structural component, which were subsequently analyzed by regression, to estimate the biomass content per tree and unit of area. The biomass of other compartments (necromass, mulch, bushes and litter fall) of the site was quantified. Variance analysis and mean tests (Tukey, 0.05) were applied for the biomass compartments according to the tree density. The regression models showed adjustments between 0.79% and 97% by structural component and total tree, using inventory variables (diameter at breast height and total height). The high recommended density (> 1500 trees ha⁻¹) presented the largest biomass stores in stem (8048.3 kg ha⁻¹), branches (141.3 kg ha⁻¹), leaves (146.2 kg ha⁻¹) and roots (1350.0 kg ha⁻¹). The clearcutting silvicultural treatment at seven years of its application favors the natural regeneration of the forest with 11.91 t ha⁻¹ of biomass distributed in different compartments.

KEYWORDS: biomass compartments, tree density, Ixtlán de Juárez, allometric models, destructive sampling.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales almacenan carbono (C) durante el proceso fotosintético en sus estructuras en forma de biomasa y se estima que 90% total que existe en la Tierra, se encuentra almacenada en tallos, ramas, hojas, frutos y raíces de las plantas (Razo-Zárate, Gordillo-Martínez, Rodríguez-Laguna, Maycotte-Morales y Acevedo-Sandoval, 2013). Chávez-Aguilar *et al.* (2016) comentan que cuantificar esos valores es importante, porque la cantidad de biomasa que posee un bosque permite el conocimiento de procesos importantes para el ecosistema como la productividad, ciclo de nutrientes, movimiento de materia y energía, fijación y almacenamiento de C, entre otros (Pavón, 2005).

El escenario para la fijación y almacenamiento de C en los ecosistemas forestales tiene un alto potencial cuando se incorporan a la biomasa total los componentes del árbol (tallo, ramas, hojas y raíces) y de piso forestal (herbáceas, arbustos, necromasa, mantillo y follaje caído) (Chávez-Pascual, Rodríguez-Ortiz, Enríquez-del Valle, Velasco-Velasco y Gómez-Cárdenas, 2017). Así se estima una cantidad real de la biomasa que almacena el ecosistema (Ruiz-Díaz, Rodríguez-Ortiz, Leyva-López y Enríquez-del Valle, 2014).

Los modelos alométricos son herramientas que se utilizan para estimar biomasa de los árboles y que son construidos a partir de variables dasométricas de fácil medición en campo como el diámetro normal (*DN*) y altura total (*AT*), sin embargo estos modelos han sido utilizados para estimar biomasa total por árbol (Acosta-Mireles, Carrillo-Anzures y Díaz, 2009; Acosta-Mireles, Vargas-Hernández, Velázquez-Martínez y Etchevers-Barra, 2002; Carrillo, Acosta, Jiménez, González y Etchevers, 2016; Méndez-González, Luckie-Navarrete, Capó-Arteaga y Nájera-Luna, 2011; Silva-Arredondo & Nívar-Cháidez, 2010). No obstante, Soriano-Luna, Ángeles-Pérez, Martínez-Trinidad, Plascencia-Escalante y Razo-Zárate (2015) recomiendan generar ecuaciones alométricas por componente estructural del árbol, porque permite conocer la cantidad de biomasa que se almacena en cada uno de ellos, además hacer el seguimiento de la cantidad de C que

se extrae o se modifica en las actividades del manejo forestal como aclareos, podas, etc.

Cuando el silvicultor aplica un tratamiento silvícola debe poner interés en evaluar la capacidad del área para establecer la regeneración natural, ya que dependiendo de su resultado se analiza el éxito o fracaso de las cortas de regeneración aplicadas, en cuanto a cantidad y calidad de la regeneración natural, lo cual conducirá a determinar las futuras alternativas de manejo forestal (Leyva-López, Velásquez-Martínez y Ángeles-Pérez, 2010). Diversos autores refieren que cuando se aplica la intervención silvícola trae como consecuencia el aumento de la biomasa forestal y su cuantificación es de importancia para entender el funcionamiento y dinámica de los ecosistemas forestales (Barth, Giménez, Joseau, Gauchat y Fassola, 2016; Chávez-Aguilar *et al.*, 2016; Chávez-Pascual *et al.*, 2017). En este sentido, Fonseca, Alice y Rey, (2009) comentan que la biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica en los componentes estructurales de los árboles y que sirve para hacer estimaciones en la fijación de carbono.

Estimar la cantidad de biomasa que almacenan los árboles en sus estructurales vegetales es difícil, puesto que el proceso de acumulación es dinámico, está en función de la edad, tamaño de los componentes arbóreos, la densidad arbórea, la comunidad vegetal, entre otras. Conocer ese patrón de cambios a través del tiempo requiere un estudio a largo plazo (Binkley, 2004; Castilho *et al.*, 2006; Gargaglione, Peri y Rubio, 2010). Una forma de simplificar y conocer la cantidad de biomasa que se almacena en un sitio, es mediante el enfoque seccional, es decir cuantificar la biomasa en un momento determinado del tiempo (Figueroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez y De los Santos-Posadas, 2010).

La densidad arbórea es un indicador que permite de manera sencilla y objetiva caracterizar la acumulación de la biomasa en los ecosistemas forestales, en especial en áreas donde la regeneración se está estableciendo, debido a que representa la demanda de árboles por espacio de crecimiento y permite conocer el arreglo de la vegetación (Hernández *et al.*, 2013). Además, en el manejo forestal es



un criterio importante para modificar la tasa de crecimiento de los árboles, por lo tanto, en el almacenamiento de biomasa (Razo-Zárate *et al.*, 2013). Es por ello que las investigaciones sobre la influencia de la densidad en la acumulación de la biomasa son importantes porque Colter, Will, Barron-Gafford, Teskey y Barry, (2003) hacen referencia que a medida que aumenta la densidad arbórea, la competencia por el espacio y nutrientes del suelo se incrementa y por lo tanto la distribución de la biomasa en las estructuras se modifican (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010). Oliver y Larson (1990) refieren que los árboles asignan mayor acumulación de biomasa en el follaje y raíces cuando están en un escenario de competencia intraespecífica, esto porque les permite captar mayor luz solar, agua y nutrientes, mientras que el fuste muestra una jerarquía menor en la acumulación.

La comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México es pionera en el manejo forestal sustentable. Desde 2004 hasta 2014 han aplicado el método de matarrasa en franjas o selección grupal en fajas con la intención principal de aumentar la productividad, mediante el establecimiento de una mayor densidad de regeneración, balancear la proporción de especies y recuperar áreas de baja productividad. En donde *Pinus patula* Schl. *et* Cham es la especie de mayor productividad y extensión con aproximadamente 5000 ha (Servicios técnicos forestales [STF]-Ixtlán, Oaxaca, 2015). Esta especie tiene una tasa de crecimiento rápida, presenta una conformación de copas pequeñas, poda natural adecuada, fuste recto relativamente libre de nudos y, en general, buena calidad de la madera (Castellanos, Velázquez, Vargas, Rodríguez y Fierros, 1996; Dvorak *et al.*, 2000; Monroy, 1996).

OBJETIVOS

Analizar la distribución de la biomasa en los componentes estructurales de *Pinus patula* en fase de vardascal, así como de compartimentos en áreas tratadas con matarrasa en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó durante 2014 en las áreas bajo manejo forestal maderable de la comunidad de Ixtlán de Juárez, localizada en la región Sierra Norte, Oaxaca, México. Los sitios a matarrasa se ubican entre 17°18'16" y 17°34'00" LN y 96°31'38" y 96°20'00" LO. La temperatura media anual es de 17.9 °C. El clima es C (m) (W") b (i') g, templado húmedo con lluvias en verano. El tipo de suelo predominante en el área de estudio es acrisol húmico (Ah) con textura media limosa. Las pendientes varían de 30% a 50% y la altitud entre 2854 m y 2882 m (STF-Ixtlán, Oaxaca, 2015).

Muestreo destructivo

En 2014 se utilizó muestreo dirigido, que consistió en seleccionar franjas a matarrasa establecidas en 2007, donde la distribución y densidad de la regeneración fuera recomendable-alta, recomendable-media y suficiente, según Moreno (2001). Se instalaron tres sitios en las densidades arbóreas antes descritas, de 400 m² con separación de 50 m entre ellos, para medir variables dasométricas a todos los individuos: DN (a la altura de 1.3 m sobre el suelo con una cinta diamétrica, cm) y AT (cinta métrica, m); además fueron registradas variables de sitio: número de sitio y de franja, exposición, altitud (m) y coordenadas geográficas (GPS Garmin modelo Etrex 20), además de pendiente (%).

Con la información obtenida se generaron categorías diamétricas para distribuir la muestra de 90 árboles en las tres densidades evaluadas, de acuerdo con la frecuencia relativa. Los árboles seleccionados fueron sanos y sin deformidades. El derribo se realizó con motosierra STHIL® modelo MS180 a ras de suelo. Fueron medidas las siguientes variables: diámetro normal (DN, cm) con vernier Foy® modelo 128, altura total (AT, m), longitud de fuste limpio (LFL, m), longitud de copa viva (LCV, m) con cinta métrica 30 m Truper® modelo TR-30ME. El fuste del árbol fue seccionado en trozas de 1 m de longitud hasta el ápice y se midieron diámetros con corteza de los extremos (cm),

para posteriormente calcular el volumen utilizando el método de trozas traslapadas (Bailey, 1995).

Biomasa de árboles

De los árboles derribados, la copa fue dividida en tres secciones transversalmente para la separación de ramas y follaje. Se contabilizó el número de ramas, a las que se midió diámetro basal de rama (DBR, cm), longitud de rama (cm) y altura de inserción de rama (AR, m), posteriormente se eligieron tres muestras aleatorias por sección para ramas y follaje. Para el fuste, se extrajo una rodaja de 5 cm de espesor de la parte media del árbol y obtener la gravedad específica (GE, g cm⁻³) con lo descrito por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011). Además, a dos árboles por sitio les fueron extraídas las raíces en su totalidad mediante la excavación directa, haciendo uso de herramienta manual con el fin de obtener el sistema radical completo, que incluyó raíces gruesas y finas. Todas las muestras fueron pesadas en fresco (g) para obtener con precisión el contenido de humedad con báscula OHAUS® modelo CS500 con capacidad de 5 kg ± 0.1 g.

Las muestras de cada componente del árbol se colocaron en la estufa de secado Memmert® modelo UFP800DW, a diferentes temperaturas: hojas, ramas y raíces a 75 °C y rodajas a 100 °C, hasta obtener peso constante. El peso seco (g) de las muestras fue determinado con balanza analítica Sartorius® modelo SAR TALENT1. La biomasa del componente fuste+corteza, se obtuvo con el producto de volumen total de trozas y GE. En ramas, hojas y raíces se utilizó el factor de conversión $B = ((P_s / P_v) \times (P_t) / 1000)$, donde: B = biomasa (kg), P_s = peso seco de la muestra (g), P_v = peso fresco de la muestra (g), P_t = peso total del componente/árbol (g). La biomasa total del árbol fue el resultado de la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste + corteza, ramas, follajes y raíces).

Se desarrollaron modelos recomendados por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012), para estimar biomasa en ramas, hojas y raíces de forma individual y que se utilizaron

para integrar la biomasa de los compartimentos a nivel árbol.

$$B_{rama} = 52.97 \times ABR^{0.69} \times AR^{-0.39} \quad (1)$$

$$B_{hoja} = 41.57 \times ABR^{0.48} \times SEC^{-0.4} \times AR^{0.08} \quad (2)$$

$$B_{raíz} = 77.89 \times DN^{1.36} \quad (3)$$

Donde:

$B_{rama, hoja, raíz}$ = biomasa de rama, hoja y raíz (g)

ABR = área basal de rama (cm²) obtenida de $\pi/4(DBR)^2$

AR = altura de inserción de rama (m),

SEC = sección de copa a la que pertenece la rama

DN = diámetro normal (cm).

Los modelos mostraron coeficientes de determinación ajustados 0.56, 0.69 y 0.89 para ramas, hojas y raíces, respectivamente.

Biomasa de otros compartimentos

En arbustos y hierbas, se ubicó una subparcela de 9 m² al norte del centro del sitio, para colectar todo el material presente. En la misma subparcela se recogió la necromasa, es decir toda la materia muerta, incluyendo ramas y árboles muertos en pie. En 1 m², ubicado en la parte sur del centro del sitio, se acumuló en una bolsa de plástico todo el mantillo de esa superficie. Para la biomasa de follaje caído, se distribuyeron de forma aleatoria tres trampas circulares de 1 m² de superficie en cada sitio para acumular el desfronde de follaje de los árboles durante 12 meses (2014-2015). De cada compartimento se obtuvo el peso fresco (g) para posteriormente tomar una muestra menor a 1 kg y ser colocada en la estufa de secado a 75 °C, después con la balanza analítica se determinó el peso seco (g). La biomasa se calculó con el factor de conversión de biomasa $B = (PS/PF)/1000$. Donde, B = biomasa (kg), PS = peso seco y PF = peso fresco.



Análisis estadístico

A la información obtenida en campo se le comprobó los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con la prueba de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente. Posteriormente, se ajustaron modelos matemáticos recomendados en la literatura con el procedimiento MODEL (Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Treviño-Garza y Razo-Zárate, 2009; Ruiz-Peinado, del Río y Montero, 2011). Los modelos se evaluaron con sus valores estadísticos: significancia, coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adi}), cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV), suma y dispersión de residuales. Los mejores modelos se aplicaron para estimar la biomasa de cada componente estructural y total por individuo. Además, se realizó un análisis de varianza (procedimiento ANOVA) y prueba de separación de medias (Tukey, 0.05), bajo un modelo estadístico completamente aleatorizado, para observar diferencias de la acumulación de biomasa en las diferentes densidades. Todos los procedimientos estadísticos fueron realizados en el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004).

RESULTADOS

Ecuaciones de biomasa por componente estructural

La ecuación de tipo lineal que fue utilizada para estimar biomasa en el componente fuste y biomasa total fue sobresaliente, debido a que mostró mayor bondad de ajuste ($R^2 = 0.97$) y sus estimadores de regresión confiables ($p \leq 0.0001$). Por lo tanto, las variables diámetro normal y altura del árbol ayudan a explicar 97% del total de la variación de la biomasa para componente fuste y total árbol. A diferencia del modelo de tipo no lineal, que estimó con menores ajustes pero con los parámetros de regresión significativos a los componentes ramas, hojas y raíces (0.80, 0.79 y 0.92, respectivamente), utilizando solo a la variable diámetro normal como predictora de la biomasa (Tabla 1).

Biomasa de los compartimentos a diferentes densidades

La biomasa de los compartimentos fuste, ramas y hojas fue diferente en las densidades arbóreas de acuerdo con el análisis de varianza ($p \leq 0.05$). En donde la densidad recomendable-alta (> 1500 árboles ha^{-1}) presentó los mayores almacenes de biomasa en fuste, ramas y hojas (8.04 t ha^{-1} , 0.14 t ha^{-1} , 0.14 t ha^{-1} , respectivamente). En contraste con los demás compartimentos que no presentaron diferencias estadísticas. De forma general, los compartimentos que almacenan mayor biomasa en las tres densidades son fustes, follaje caído y raíces (Tabla 2).

El fuste es el compartimento que mayor biomasa acumula, 6.3 t ha^{-1} que representa 82.4% de la biomasa arbórea total promedio, seguido de raíces con 14.5% y, por último, ramas y hojas 3.1%. Por otro lado, el compartimento follaje caído es una fuente principal de biomasa para el piso forestal con 1.83 t ha^{-1} . En este sentido, la biomasa total promedio del sitio es igual a 11.91 t ha^{-1} (Fig. 1).

DISCUSIÓN

Ecuaciones de biomasa

Los coeficientes de determinación obtenidos en los componentes estructurales son cercanos a los encontrados por Méndez-González *et al.* (2011) de 0.86 en ramas y hojas, 0.94 en fuste para *Pinus pseudostrabus* Lindl. en una plantación mixta de 12 años en Guanajuato. A diferencia de Figueroa-Navarro *et al.* (2010), quienes obtuvieron coeficientes 0.90 para follaje, 0.99 en ramas y fuste y 0.97 en biomasa total de *P. patula* Schltdl. *et Cham.*, en Hidalgo. De acuerdo con los resultados obtenidos, las ecuaciones poseen buenos estadísticos de ajuste en los componentes estructurales y biomasa total. Lo anterior puede atribuirse a lo que comentan Delgado, Acevedo, Castellanos, Ramírez y Serrano (2005), que existe una estrecha relación alométrica entre el diámetro y la biomasa, es decir, que en cuanto incrementan el diámetro se espera una mayor acumulación de biomasa (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

TABLA 1. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa por componente estructural de *Pinus patula*.

Ecuación	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para H0: parámetro = 0	Prob > t
$B_{fuste} = (DN^2 \times AT) / (\beta_0 + (\beta_1 \times DN))$... $R^2 = 0.97$					
Ordenada al origen	β_0	43.59	1.79	24.33	0.0001
$DN^2 \times AT$	β_1	3.31	0.14	23.42	0.0001
$B_{ramas} = \beta_0 \times DN^{\beta_1}$ $R^2_{adj} = 0.80$					
Ordenada al origen	β_0	61.72	0.33	183.79	0.0001
DN	β_1	0.13	0.003	45.38	0.0001
$B_{hojas} = \beta_0 \times DN^{\beta_1}$... $R^2_{adj} = 0.79$					
Ordenada al origen	β_0	68.72	0.25	272.39	0.0001
DN	β_1	0.09	0.002	43.81	0.0001
$B_{raíces} = \beta_0 \times DN^{\beta_1}$ $R^2_{adj} = 0.92$					
Ordenada al origen	β_0	95.84	3.49	27.41	0.0001
DN	β_1	1.18	0.01	72.26	0.0001
$B_{total} = (DN^2 \times AT) / (\beta_0 + (\beta_1 \times DN))$... $R^2 = 0.97$					
Ordenada al origen	β_0	0.02	0.001	23.11	0.0001
$DN^2 \times AT$	β_1	0.004	0.00009	46.41	0.0001

B = biomasa en fuste (kg), ramas, hojas y raíces y total (g), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), β_0, β_1 = parámetros de regresión, R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado, R^2 = coeficiente de determinación.

TABLA 2. Compartimentos de biomasa en relación con la densidad arbórea de *Pinus patula*.

Compartimento de biomasa	Pr > F	Biomasa ($t\ ha^{-1}$)		
		Recomendable-alta (>1500 $\#$)	Recomendable-media [1283-1500 $\#$]	Suficiente (< 1283 $\#$)
Fuste	0.037	8.04 ± 1.19 a	5.97 ± 1.40 ab	5.02 ± 0.45 b
Ramas	0.004	0.14 ± 0.02 a	0.10 ± 0.003 b	0.08 ± 0.003 b
Hojas	0.008	0.14 ± 0.02 a	0.11 ± 0.004 b	0.09 ± 0.003 b
Raíz	0.268	1.35 ± 0.46 a	1.05 ± 0.11a	0.95 ± 0.04 a
Necromasa	0.452	0.04 ± 0.02 a	0.02 ± 0.01 a	0.06 ± 0.05 a
Herbáceo	0.830	0.58 ± 0.08 a	0.69 ± 0.23 a	0.66 ± 0.27a
Mantillo	0.181	0.77 ± 0.32 a	0.49 ± 0.28 a	0.32 ± 0.12 a
Arbustivo	0.423	0.08 ± 0.04 a	0.06 ± 0.01 a	0.08 ± 0.03 a
Follaje caído	0.700	1.95 ± 0.83 a	1.52 ± 0.68 a	2.02 ± 0.78 a
Total	0.720	11.41 ± 3.09 a	13.54 ± 1.25 a	10.78 ± 1.01 a

Letras diferentes en hileras representan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). La media se acompaña ± desviación estándar. $\#$ árboles ha^{-1} .

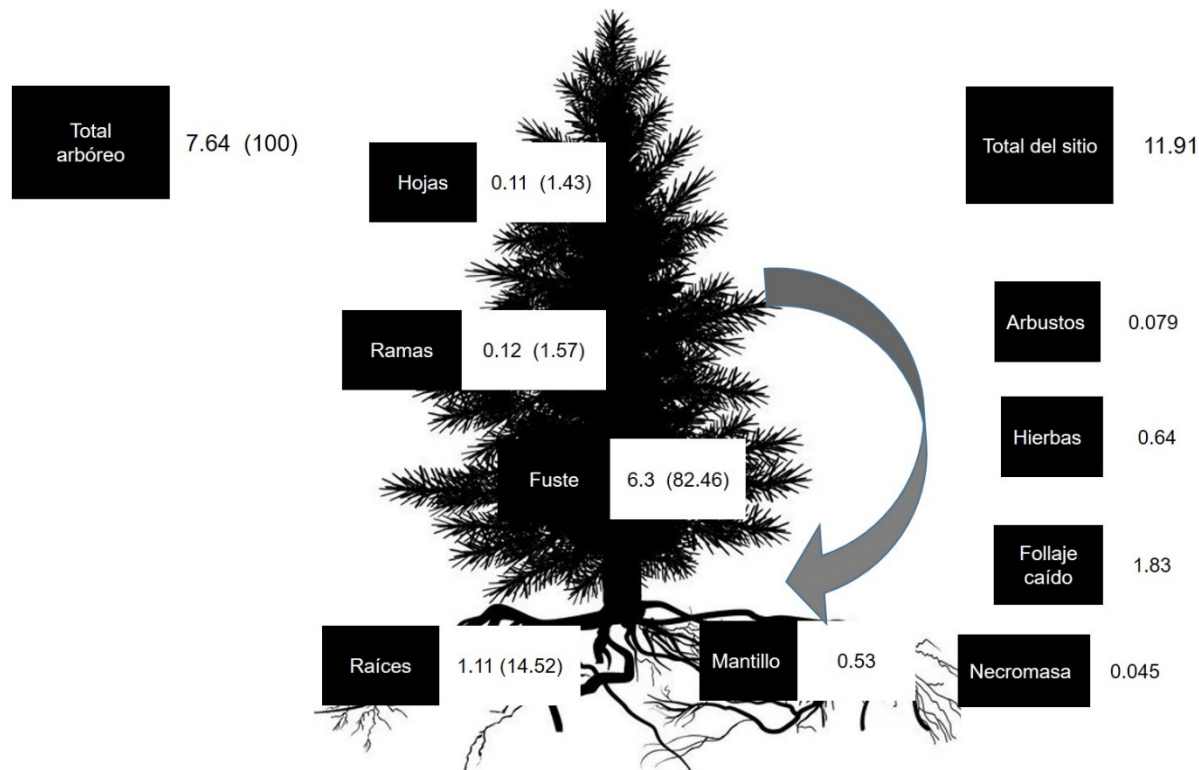


FIGURA 1. Distribución de la biomasa en toneladas por hectárea y (porcentaje) de los diferentes compartimentos de la regeneración de *Pinus patula* en franjas a matarrasa.

Otras experiencias en ajuste de modelos alométricos y variables utilizadas son, por ejemplo, Kim, Yoo, Jung y Lee (2017), quienes calcularon la biomasa en los componentes estructurales (fuste, ramas, hojas y raíces) de *Pinus thunbergii* Parl. y *P. densiflora* S. et Z. en Korea, con coeficientes de determinación entre 0.69 y 0.94, haciendo uso del DN en la regresión. Suficientes investigaciones han demostrado que el DN es la variable regresora que ayuda a explicar la mayor parte en la variación total de la biomasa en especies forestales, obteniendo ajustes superiores a 90% (Acosta-Mireles *et al.*, 2009; Avendaño, Acosta, Carrillo y Etchevers, 2009; Pacheco *et al.*, 2007). Por su parte, Canga, Dieguez-Aranda, Afif-Khoury y Camara-Obregon (2013) y Garcia, Machuca y Ferreira (2011) con variables DN y AT obtuvieron ajustes de 93% y 94%, respectivamente en la biomasa total en especies forestales. Lima, Barreto-Garcia, Sanquetta, Novaes y Melo (2016) obtuvieron ajustes de 90% utilizando a la variable DN² y AT en rodales homogéneos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Brasil. En

relación con lo anterior, Cutini, Chianucci y Manetti, (2013) y Vargas-Larreta *et al.* (2017) discuten que no siempre la variable DN, AT, o la combinación de ambas ajustan bien en la regresión para estimar la biomasa de los árboles. Dependiendo de la expresión del modelo (tipo lineal, no lineal, polinómico, etc.), es preferible seleccionar los predictores de forma cuidadosa, de manera que, dependiendo de las ganancias en el ajuste deben ser incluidos o cesados (Sigala, González, Prieto, Basave y Jiménez, 2016).

Biomasa a diferentes densidades

Con respecto al porcentaje de acumulación de biomasa en el fuste, los valores son superiores a los descritos por Chávez-Aguilar *et al.* (2016), quienes refieren que el componente fuste, representa en promedio 70% de la biomasa aérea en *P. patula* en el estado de Hidalgo. Carrillo, Acosta, Flores, Juárez y Bonilla, (2014) obtuvieron un valor cercano de 77% en *Pinus montezumae* Lamb. en la Sierra Nevada de México.

Un compartimento poco evaluado en muchos estudios es el sistema radical de los árboles debido a la dificultad en la medición (Alberto & Elvir, 2008). Sin embargo, en esta investigación se obtuvo que es el segundo compartimento de mayor importancia en la acumulación de la biomasa a nivel árbol. En este sentido, Mendoza-Ponce y Galicia (2010) describen que en una reforestación de *P. patula* en Veracruz, de 12 años y una densidad de 3028 árboles ha⁻¹, encontraron una biomasa de raíces de 3 t ha⁻¹ de biomasa, valor cercano a este estudio, si se considera la diferencia de edad y densidad arbórea. Durkaya, Durkaya y Ulu Say, (2016) encontraron que en promedio la biomasa de raíces es de 16.6% para árboles jóvenes de plantaciones y bosque nativo de *Pinus sylvestris* L. en Turquía. Xiao y Ceulemans (2004) señalan que la biomasa de raíces representa 19.1% de la biomasa total por árbol, en *Pinus sylvestris* L. de 10 años de edad, en Bélgica. En relación con la biomasa de raíces, Augusto *et al.* (2015) comentan que la parte subterránea de los árboles, representa una cantidad notable de biomasa que necesita ser considerada cuando se estima la biomasa total del árbol, lo que implica sumar la biomasa aérea y biomasa subterránea.

De acuerdo con las categorías de densidad arbórea suficiente y recomendable que fueron encontradas en los sitios con matarrasa de siete años (Moreno, 2001); así como la distribución de la biomasa en los componentes estructurales de los árboles y de los compartimentos del sitio, permite dilucidar que el establecimiento de la nueva masa está asegurada. Al respecto, Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez (2009) y Pensado-Fernández, Sánchez-Velázquez, Pineda-López y Díaz-Fleischer (2014) refieren que la adecuada densidad y distribución de la regeneración son estimadores del potencial que posee *Pinus patula* y las condiciones del sitio para reestablecer el bosque, así mismo de la bondad en la aplicación de la matarrasa. En este sentido, se pone de manifiesto que el manejo forestal dejó a un lado la idea de aumentar la biomasa forestal solo para aprovechamiento maderable, en el siglo XXI se habla de un manejo forestal sustentable donde la los esfuerzos se enfocan a manejar el bosque en el marco de visión ecosistémica, paisajista, integral, participativa y de uso

múltiple, orientado a la obtención del rendimiento sostenido de los diversos productos, bienes y servicios (Aguirre-Calderón, 2015).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los estimadores estadísticos, los modelos ajustados para estimar biomasa total y por componentes estructurales de *Pinus patula* son adecuados y confiables. Por lo que, fuste, ramas, hojas y raíces almacenaron en promedio 6.3 t ha⁻¹, 0.12 t ha⁻¹, 0.11 t ha⁻¹ y 1.11 t ha⁻¹, que representan 82.46%, 1.57%, 1.43% y 14.52%, respectivamente de la biomasa arbórea total promedio. Las franjas a matarrasa catalogadas con regeneración recomendable-alta (> 1500 árboles ha⁻¹) generan la mayor cantidad de biomasa en tallo, ramas y hojas. La biomasa total promedio acumulada en las tres densidades en la fase de vardascal a los siete años de aplicar la matarrasa fue de 11.91 t ha⁻¹, que incluyen componentes estructurales del árbol (fuste, hojas, ramas y raíces) y compartimentos (follaje caído, necromasa, mantillo, herbáceas y arbustos), traduciéndose en que el tratamiento silvícola matarrasa posee la capacidad de renovar el bosque, así como de los servicios ecosistémicos.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz, L. M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105–114. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n2/v27n2a3.pdf>
- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & 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(6), 725–736. Recuperado de <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2002/nov-dic/art-10.pdf>
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21 (especial), 17–28. doi: 10.21829/myb.2015.210423
- Alberto, D. M., & Elvir, J. A. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. *Investigación Agraria: Sistemas y*



- Recursos Forestales*, 17(1), 67–78. Recuperado de http://www.inia.es/gcontrec/pub/067-078-Acumulacion_1208252685250.pdf
- Augusto, L., Achat, D. L., Bakker, M. R., Bernier, F., Bert, D., Danjon, F., ... Trichet, P. (2015). Biomass and nutrients in tree root systems-sustainable harvesting of an intensively managed *Pinus pinaster* (Ait.) planted forest. *Bioenergy*, 7, 231–243. doi: 10.1111/gcbb.12127
- Avendaño H., D. M., Acosta M., M., Carrillo A., F., & Etchevers B., J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233–238. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61011739008>
- Bailey, R. L. (1995). Upper stem volumes from stem analysis data: an overlapping bolts method. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 170–173. doi.org/10.1139/x95-020
- Barth, S. R., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., & Fassola, H. E. (2016). Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. *Scientia Forestalis*, 44(111), 653–664. doi.org/10.18671/scifor.v44n111.11
- Binkley, D. (2004). A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *Forest Ecology and Management* 190, 265–271. doi.org/10.1016/j.foreco.2003.10.018
- Canga, E., Dieguez-Aranda, I., Afif-Khoury, E., & Camara-Obregon, A. (2013). Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. *Forest Systems*, 22(3), 408–415. doi.org/10.5424/fs/2013223-04143
- Carrillo A., F., Acosta M., M., Jiménez C., C. R., González, M. L., & Etchevers B., J. D. (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), 681–691. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263145554017.pdf>
- Carrillo A., F., Acosta M., M., Flores A., E., Juárez B., J. E., & Bonilla P., E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5), 779–793. Recuperado de <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/901>
- Castelán-Lorenzo, M. & Arteaga-Martínez, B. (2008). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 49–57. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62916073005>
- Castellanos, J. F., Velázquez M., A., Vargas H., J. J., Rodríguez F., C., & Fierros G., A. M. (1996). Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Agrociencia*, 30(1), 123–128.
- Castilho, C.V., Magnusson, W. E., Araújo, O. N. R., Luizão, C.C. R., Luizão, J. F., Lima, P. A., & Higuchi, N. (2006). Variation in aboveground tree live biomass in a Central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management*, 234, 85–96. doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.024
- Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. A., García-Moya, E., & Wayson C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtípán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 23–36. doi.org/10.21829/myb.2016.2231454
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & 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
- Colter, B. E., Will, R. E., Barron-Gafford, G. A., Teskey, R. O., & Barry, S. (2003). Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science*, 49(2), 224–234. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/cd82/d0d84043d7a67366738da1fc4714c3364ad5.pdf>
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M. C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest*, 6, 331–337. doi: 10.3832/ifer0941-006
- Delgado, L. A., Acevedo, M. F., Castellanos, H., Ramírez, H., & Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 30(5), 275–283. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910406>
- Durkaya, A., Durkaya, B., & Ulu Say, S. (2016). Below-and above ground biomass distribution of young Scots pines from plantations and natural stands. *Bosque*, 37(3), 509–518. doi: 10.4067/s0717-92002016000300008
- Dvorak, W.S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., & Stanger T. K. (2000). *Pinus patula*. In. *Conservation and*

testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative (pp. 148–173). North Carolina State University, Raleigh, NC, USA: CAMCORE.

- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & De los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v1n1/v1n1a12.pdf>
- Fonseca, G. W., Alice, G. F., & Rey, B. J. M. (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. Recuperado de <http://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v30n1/art06.pdf>
- García, M. N., Machuca, H. M. A., & Ferreira, C. R. L. (2011). Modelo para cálculo estimación del carbono en tipo forestal roble-raulí-coigüe en la Reserva Nacional Malleco-Chile. *Revista Árvore*, 35(6), 1299–1306. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v35n6/a16v35n6.pdf>
- Gargaglione, V., Peri, P. L., & Rubio, G. (2010). Allometric relations for biomass partitioning of *Nothofagus antarctica* trees of different crown classes over a site quality gradient. *Forest Ecology and Management* 259, 1118–1126. doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.025
- Hernández R., J., García M., J. J., Muñoz F., H. J., García C., X., Sáenz R., T., Flores L., C., & Hernández R., A. (2013). Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 62–77. doi: 10.29298/rmcf.v4i19.379
- Kim, C., Yoo, B. O., Jung, S. Y., & Lee K. S. (2017). Allometric equations to assess biomass, carbon and nitrogen content of black pine and red pine trees in southern Korea. *iForest*, 10, 493–490. doi: 10.3832/ifor2164-010
- Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 227–239. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.06.038
- Lima, M. C., Barreto-García, P. A. B., Sanquetta, C. R., Novaes, B. A., & Melo, L. C. (2016). Biomass and carbon stock from *Pinus caribaea* var. hondurensis under homogenous stands in southwest Bahia, Brazil. *Ciência Rural*, 46(6), 957–962. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/cr/v46n6/1678-4596-cr-46-06-00957.pdf>
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45(4), 479–491. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n4/v45n4a7.pdf>
- Mendoza-Ponce, A., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in Highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497–506. doi:10.1093/forestry/cpq032
- Monroy, R. C. (1996). Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Huayacocotla, Estado de Veracruz. *Ciencia Forestal en México*, 21(80), 57–77. Recuperado de www.inifap.gob.mx/Documents/revistas/rmcf/CF080.pdf
- Moreno G., D. A. (2001). *La regeneración de pino como sustentabilidad del sistema de manejo integral (SIMANIN) en Tapalpa, Jalisco*. Guadalajara, Jalisco, México: Inifap-Sagarpa. Recuperado de <http://utep.inifap.gob.mx/tecnologias/12.%20Forestales/Matriz%20para%20evaluar%20regeneraci%C3%B3n%20natural.pdf>
- Oliver, C. D. & Larson, B.C. (1990). *Forest stand dynamics*. Nueva York, EUA: Mac Graw-Hill.
- Pacheco E., F. C., Aldrete, A., Gómez G., A., Fierros G., A. M., Cetina-Alcalá, V. M., & Vaquera, H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 251–254. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61003006>
- Pavón, N. P. (2005). Biomass and root production of two plant life forms in a semiarid Mexican scrub: responses to soil nitrogen availability. *Canadian Journal of Botany*, 83(10), 1317–1321. doi.org/10.1139/b05-113
- Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M. del R., & Díaz-Fleischer, F. (2014). Plantaciones forestales vs. Regeneración natural *in situ*: el caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92(4), 617–622. doi.org/10.17129/botsci.109
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en



árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 73–86. doi: 10.21829/myb.2013.192341

- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317–327. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/15164>
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos S., R. A. (2016). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesa de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94. Recuperado de <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/53>
- Rodríguez-Ortiz, G., De los Santos-Posadas, H. M., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, & Fierros-González 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. doi: 10.21829/myb.2012.1811116
- Rodríguez-Ortiz, G., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., De los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero A., & 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. Recuperado de www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/34-3/8a.pdf
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Leyva-Lopez, J. C., & Enríquez-del Valle, J. R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–44. Recuperado de http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidir.oaxaca.ipn.mx.revista/files/pdf/vol12num1/nyd_vol12_num1_2014_art3.pdf
- Ruiz-Peinado, R., del Rio, M., & Montero G. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20(1), 176–188. Recuperado de <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/1880/1487>
- Servicios Técnicos Forestales [STF]-Ixtlán, Oaxaca. (2014). *Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación de los recursos forestales maderables de Ixtlán de Juárez: ciclo de corta 2015-2024*. Ixtlán de Juárez, Oaxaca: Autor.
- Sigala R., J. A., González T., M. A., Prieto R., J. A., Bassave V., E., & Jiménez P., J. (2016). Relaciones alométricas para predecir biomasa en plantas de *Pinus pseudostrobus* cultivadas en diferentes sistemas de producción en vivero. *Bosque*, 37(2), 369–378. doi: 10.4067/s0717-92002016000200015
- Silva-Arredondo, F. M., & Návar-Cháidez, J. J. (2010). Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 55–62. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v1n1/v1n1a7.pdf>
- Soriano-Luna, M. A., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. Recuperado de www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2015/may-jun/art-6.pdf
- SAS Institute Inc. (2004). *SAS/STAT 9.1 User's guide*. Cary, NC USA.
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 1–20. doi:10.3390/f8080269
- Xiao, C. W., & Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for below-and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management*, 203, 177–186. doi:10.1016/j.foreco.2004.07.062

Manuscrito recibido el 16 de febrero de 2018

Aceptado el 5 de mayo de 2018

Publicado el 15 de febrero de 2019

Este documento se debe citar como:

Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. A., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511713. doi: 10.21829/myb.2019.2511713



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.