



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.550>

Artículo

Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas

Stored carbon estimation of a *Tectona grandis* L. f. plantation using allometric equations

Javier Jiménez Pérez¹, Ricardo Telles Antonio^{*1}, Eduardo Alanís Rodríguez¹, José Israel Yerena Yamallel¹, Dora Alicia García García³ y Martín Gómez Cárdenas²

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is the main anthropogenic greenhouse gas (GHG) in the atmosphere. The objective of the research described below was to estimate the carbon stored from mensuration variables and allometric equations in a *Tectona grandis* plantation in Michoacán, Mexico. Thus, a mathematical model was adjusted using the Model procedure and Gauss-Newton algorithm. The evaluation of the mathematical model was made from the sum of the square of the error (SCE), the root of the mean quadratic error (REMC) and R²_{adj} in addition to the significance of its parameters. Compliance with the assumptions of normality, homogeneity of variances and independence of waste frequency was verified. The values of the parameters of the adjusted model were SCE=0.0399, REMC=0.0179 and R²_{adj}=0.82. The Shapiro-Wilk test (0.96), White's test (12.99) and the Durbin-Watson test (2.01) do not violate regression assumptions and are best for estimation of the dependent variable. The *T. grandis* plantation has a density of 1 666 trees ha⁻¹, 220.29 m³ ha⁻¹ of wood, basic density 0.59 g cm³ and stores 77.20 ton ha⁻¹ of carbon at 11 years old. The adjusted equation allows to estimate in an indirect way the carbon stored in the trees, it can be adjusted for plantations with similar bioclimatic conditions, in addition it is feasible to incorporate it to the productivity systems to evaluate the potential of the commercial forest plantations as environmental services in order to mitigate the CO₂ emissions.

Key words: Carbon dioxide, climate change, biomass expansion factor, allometric model, forest plantations, *Tectona grandis* L. f.

Resumen

El bióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero (GEI) antropogénico de la atmósfera. El objetivo de la investigación que se describe a continuación consistió en estimar el carbono almacenado a partir de variables dasométricas y ecuaciones alométricas en una plantación de *Tectona grandis* en Michoacán, México. Para ello se ajustó un modelo matemático mediante procedimiento *Model* y algoritmo *Gauss-Newton*. La evaluación del modelo matemático se realizó en función de la suma de cuadrado del error (SCE), la raíz del error medio cuadrático (REMC) y R²_{adj} además de la significancia de sus parámetros. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de la frecuencia de residuos. Los valores de los parámetros del modelo ajustado fueron SCE=0.0399, REMC=0.0179 y R²_{adj}=0.82. La prueba de *Shapiro-Wilk* (0.96), la de *White* (12.99) y la de *Durbin-Watson* (2.01) no violan los supuestos de la regresión y son los mejores para la estimación de la variable dependiente. La plantación de *T. grandis* presenta una densidad de 1 666 árboles ha⁻¹, 220.29 m³ ha⁻¹ de madera, densidad básica 0.59 g cm³ y almacena 77.20 ton ha⁻¹ de carbono a los 11 años de edad. La ecuación ajustada permite estimar de manera indirecta el carbono almacenado en los árboles, puede adecuarse para plantaciones bajo condiciones bioclimáticas similares, y es factible incorporarla a los sistemas de productividad para calcular el potencial de las plantaciones forestales comerciales como proveedoras de servicios ambientales a fin de mitigar las emisiones de CO₂.

Palabras clave: Bióxido de carbono, cambio climático, factor de expansión de biomasa, modelo alométrico, plantaciones forestales, *Tectona grandis* L. f.

Fecha de recepción/Reception date: 28 de agosto de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de diciembre de 2019

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

²Campo Experimental Uruapan, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP. México.

³Campo Experimental Saltillo, Centro de Investigación Regional del Noreste, INIFAP

*Autor para correspondencia; correo-e: telles.ricardo2015@gmail.com

Introducción

El bióxido de carbono (CO_2) es el gas primordial de efecto invernadero (GEI) antropogénico de la atmósfera; contribuye con aproximadamente 65 % al forzamiento radiativo producido por los GEI de amplia permanencia (diferencia entre la insolación absorbida por la tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio) (NOAA, 2016).

El contenido de CO_2 atmosférico preindustrial se conservó por debajo de las 280 ppm (NOAA, 2019) a lo largo de los ciclos glacial e interglacial, pero se elevó hasta una media global de 409.95 ppm en agosto de 2019. El CO_2 atmosférico sumó 145 % del nivel preindustrial en 2016 a causa, principalmente, de las emisiones de la combustión de carburantes fósiles y la fabricación de cemento (en 2015 el total de emisiones de CO_2 fue $9.9 \pm 0.5 \text{ Pg C}$) (IPCC, 2015), de la deforestación y de los demás cambios del uso de suelo (en promedio $1.0 \pm 0.5 \text{ Pg C}$ para el periodo 2006–2015).

Del total de las emisiones originadas por actividades humanas durante el período 2006-2015, cerca de 44 % se almacenaron en la atmósfera, 26 % en los océanos y 30 % en la tierra (Le Quéré *et al.*, 2016). Una forma de aminorar sus efectos es almacenarlo en la biomasa por medio de la fotosíntesis (Ávila *et al.*, 2001); el potencial de captura de carbono por las comunidades vegetales varía considerando la estructura y constitución de cada ecosistema (Gómez *et al.*, 2011).

Las ecuaciones alométricas de biomasa relacionan la medición individual de esta y su evaluación en el campo a partir de los datos del inventario (Picard *et al.*, 2012). La biomasa se emplea para estimar el carbono acumulado de las especies arbóreas, por medio de la multiplicación de la cantidad aprovechable en un sitio por un coeficiente que varía de 0.40 a 0.55. Estos factores son precisados por diferentes autores, entre los cuales destacan Díaz *et al.* (2007), Jiménez *et al.* (2008), Kongsager *et al.* (2013); y Jaramillo y Correa (2015).

Algunas estimaciones demuestran que para finales del presente siglo los bosques naturales se reducirán en 30 % y las plantaciones forestales representarán 20 % de la superficie forestal del mundo (Brockerhoff *et al.*, 2013). El potencial de absorción

del sector forestal en México se ha estimado en 58 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente ($t\ CO_2e$) para el año 2020 y de 96 millones de $t\ CO_2e$ para el año 2030. Con base en lo anterior, se estima que los sumideros de carbono en la superficie forestal para el año 2022 serían competentes para neutralizar las emisiones de los demás sectores en el país (Conafor, 2013).

Una especie forestal exótica transcendental en México es *Tectona grandis* L. f. (teca), entre otras razones, por su buena aclimatación en diversas regiones de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Nayarit (Fierros, 2012). Las plantaciones de *T. grandis* pueden ser actividades atractivas para la fijación de carbono, ya que es un taxon de rápido crecimiento (Langenberger y Liu, 2013). No existen muchos casos de estudio sobre la estimación de carbono almacenado para *T. grandis* en las plantaciones de México, por lo que es ineludible desarrollar investigaciones que den resultados acertados a los propietarios de la tierra, así como a los inversionistas interesados en la especie.

T. grandis se cultiva como exótica en muchos países, pero no es invasora, pues no afecta a los ecosistemas locales; además, junto con *Gmelina arborea* Roxb. y varios taxa de pino, crece en rodales puros en el bosque natural. Si se cultiva mediante buenas prácticas de manejo silvícola, la amenaza de erosión del suelo es mínima (de Camino y Pierre, 2013). Es una opción preferida para las plantaciones, porque es de fácil propagación, establecimiento y manejo; la reputación de la teca se debe a su madera de excelente calidad a partir de sus propiedades: fuerte, liviana, durable, estabilidad dimensional; no se corroe en contacto con metales; buena trabajabilidad y dureza; resistencia a las termitas, a los productos químicos, a los hongos y al intemperismo (Keogh, 2013).

Con base en lo antes mencionado, el objetivo del estudio fue estimar el carbono almacenado a partir de variables dasométricas y ecuaciones alométricas en una plantación de *T. grandis* a los 11 años de establecida en Nuevo Urecho, Michoacán, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en una plantación forestal comercial de *T. grandis* establecida en 2003 y ubicada en el paraje El Mirador, municipio Nuevo Urecho, Michoacán, México; forma parte de la región del Eje Neovolcánico Transversal en el que están integrados los cerros El Tipítaro, Las Gallinas, Agua Fría y Las Cuevas (INEGI, 2009). Su delimitación geográfica está comprendida entre los 19°11 ' 39.6" N y los 101°51 ' 53.3" O (Figura 1), a una altitud promedio de 617 m. En el lugar, la pendiente es plana (1 % a 2 %). Los árboles se distribuyen con un espaciamiento de 2.0 × 3.0 m, que corresponde a una densidad de 1 666 árboles ha⁻¹ en una superficie de 6 ha.

Los suelos dominantes son Vertisol (38.32 %), Luvisol (32.24 %), Leptosol (26.08 %), Feozem (2.84 %), Fluvisol (0.28 %) y Regosol (0.03 %). La fórmula climática es Aw_o (w) que corresponde al tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, humedad media (91.16 %); temperatura media anual de 20 °C a 28 °C y de precipitación anual de 700 mm a 1 100 mm (INEGI, 2009).



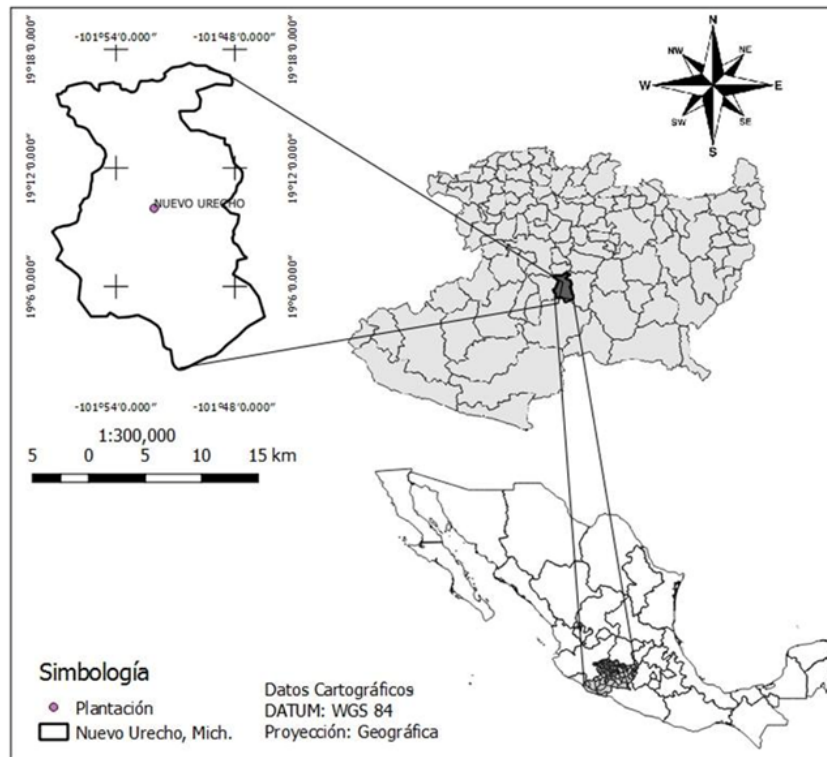


Figura 1. Área de estudio en el Municipio Nuevo Urecho, Michoacán.

Dentro del área de estudio, se seleccionó el arbolado mediante la metodología propuesta por Segura y Andrade (2008), quienes indican que los individuos por medir deben ser “típicos” de la especie y del sitio, bajo el supuesto de que los árboles coincidan con la forma y sanidad del fuste de la población muestreada; la forma de los árboles está a menudo correlacionada con su tamaño, de modo que el diámetro normal y la altura total, generalmente, explican gran parte de la variación del volumen causada por la forma, como lo señalan Emanuelli y Milla (2014).

Se escogieron algunos ejemplares sin daños ni defectos, con el fin de incluir la mayor cantidad de clases diamétricas y de altura posible, como lo sugieren Barrios *et al.* (2014). Con respecto al número de árboles, se siguió la recomendación de Louppe y Mille (2015) en el sentido de que se midan 100 árboles en caso de un rodal o de varios rodales de plantación reciente en una superficie restringida.

Datos dasométricos

La toma de datos se hizo en el año 2014, a los 11 años de edad de la plantación. Se recurrió a un muestreo selectivo de árboles con condiciones y variaciones en sus medidas para un buen ajuste. En total se midieron 128 árboles, a los cuales se les tomaron indirectamente datos de diámetro a la altura de 1.30 m ($d_{1.3}$) y altura total (AT) con el Dendrómetro *Criterion* RD 1000®.

Estimación del carbono almacenado en los árboles

Para estimar el carbono almacenado en los árboles se efectuó un muestreo no destructivo, con datos dasométricos (diámetro del fuste, altura total, área basal y volumen fustal) de *T. grandis* (Ecuación 1):

$$C_{almacenado} (tC/\text{árbol}) = (V_{cc} * D * FEB) * ((1 + R) * FC) \quad (1)$$

Donde:

V_{cc} = Volumen fustal con corteza (m^3)

D = Densidad básica ($g\ cm^{-3}$)

FEB = Factor de expansión de biomasa

$1+R$ = Factor de relación biomasa radical/biomasa total

FC = Factor de conversión de biomasa (materia seca) a carbono (%)

Volumen fustal con corteza (m^3). Este componente se determinó con la ecuación de Meyer ajustada por Telles *et al.* (2018) para la plantación de *T. grandis* establecida en Nuevo Urecho, Michoacán (Ecuación 2):

$$V = 0.127677 + -0.018420.d + 0.000815.d^2 + 0.000374.d.H + \varepsilon \quad (2)$$

Donde:

V = Volumen fustal (m^3)

d = Diámetro normal (cm)

H = Altura total (m)

Densidad básica. Para la madera de *T. grandis* ubicada en Nuevo Urecho Michoacán, la densidad básica es de 0.59 g cm^3 (Telles *et al.*, 2017).

Factor de expansión de biomasa (FEB). Se utilizó el FEB de 1.08 registrado para *T. grandis* por López *et al.* (2018).

Factor relación biomasa radical/biomasa total (R/T). MacDicken (1997) recomienda usar un valor de 0.10, el cual fue empleado por Fonseca *et al.* (2009), para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en Costa Rica; Espíritu *et al.* (2016) trabajaron con 0.20 para determinar la relación biomasa radical/biomasa total para diferentes especies en el *arboretum* El Huayo, Loreto, Perú. Se eligió el recomendado por MacDicken, (1997) por ser un valor conservador.

Factor de conversión (FC). Factor de conversión de tonelada de biomasa (materia seca) a tonelada de carbono (tC). Es el porcentaje de carbono en masa que tiene la madera; carbono 50 %; oxígeno 41 %; hidrógeno 6 %; nitrógeno 1 % y cenizas 2 %, por lo que la cantidad de carbono por tonelada de biomasa (materia seca) se aproxima a 500 kg (50 %) (Norverto, 2006). Montero y Kanninen (2006) refieren valores de 41.6 y 49.6 % para *T. grandis*.



Ajuste del modelo

La estimación de los parámetros en el ajuste del modelo matemático se llevó a cabo con métodos iterativos (Draper y Smith, 2014), mediante el procedimiento *Model* y el algoritmo *Gauss-Newton* del paquete estadístico SAS ver. 9.2[®] (*Statistical Analysis System*) (Allison, 2010), con el método de ajuste de mínimos cuadrados ordinarios (MCO).

Criterios de evaluación del modelo

La evaluación de la ecuación alométrica se efectuó a partir de la bondad de ajuste, medida con la suma de cuadrados del error (SCE), la raíz del error medio cuadrático (REMC) (Ecuación 3), el coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros del modelo (R^2_{adj}), y la significancia de los parámetros (Schlaegel, 1982; Parresol, 1999; Tedeschi, 2006):

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}} \quad (3)$$

Validación del modelo

Cuando las varianzas de la frecuencia de los residuos son heterogéneas (heterocedasticidad) o cuando los residuos son autocorrelacionados, la estimación de los coeficientes de regresión por el método de los mínimos cuadrados ordinarios es adversamente afectada y el cálculo del error estándar es tendencioso (Da Cunha *et al.*, 2009). Por lo anterior, se argumenta la validación de la ecuación matemática elegida para la comprobación de los señalados supuestos, el cual indica la calidad de la predicción.

Para verificar el cumplimiento de los supuestos de la regresión, se determinaron la normalidad, la homogeneidad e independencia de los residuos:

a) Normalidad de los residuos. Se calculó la estadística de *Shapiro-Wilk* (Ecuación 4) (Da Cunha *et al.*, 2009):

$$W_c = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

Donde:

W_c = Estadístico *Shapiro-Wilk*

$b = \sum_{i=1}^n a_i [X_{(n-i+1)} - X_i]$, siendo a_i = el valor de un coeficiente tabulado para cada tamaño de muestra y la posición i de observación

$[X_{(n-i+1)} - X_i]$ = Diferencias sucesivas que se obtienen al restar el primer valor al último valor, el segundo al penúltimo, el tercero al antepenúltimo y así hasta llegar a restar el último al primer valor

b) Homogeneidad de varianzas de residuos; una de las trascendentales suposiciones hacia los mínimos cuadrados de la regresión habitual es la homogeneidad de varianza (homocedasticidad) (Emanuelli y Milla, 2014). El método matemático para determinar si existe homogeneidad de varianza de los residuos se realizó mediante la prueba de *White* (De Arce y Mahía, 2009).

c) Independencia de residuos; se espera que la estadística " d " (Ecuación 5), sea aproximadamente igual a 2, si los residuos son independientes. En el argumento inverso, si los residuos son correlacionados positivamente, tenderán a ser cercanos de 0 (cero), o próximos a 4, si los residuos son correlacionados negativamente (Emanuelli y Milla, 2014). El valor de " d " estará proporcionado por:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (E_i - E_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (5)$$

Donde:

d = Estadística “ d ” de *Durbin-Watson*

n = Número de observaciones

E_i = Error estocástico, $y_i = \hat{y}_i$

Se analizó la distribución de los residuales mediante el método gráfico de la ecuación de regresión ajustada para estimar el carbono almacenado para *T. grandis* y observar la distribución de los residuos (diferencias entre valor observado y valor predicho), tal como lo recomiendan Álvarez *et al.* (2003), quienes mencionan que de esta forma se evidencia alguna deficiencia del modelo ajustado.

Resultados y Discusión

A partir del inventario forestal realizado en el año 2014, la plantación, integrada por 1 666 árboles ha^{-1} con una edad de 11 años, se desarrolla en una superficie de 6 ha^{-1} ; el diámetro normal promedio del arbolado es de 16.55 cm, la altura total de 13.01 m; el área basal de 2.17 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$. El volumen fustal, de 220.29 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, se calculó con la ecuación de Meyer (Telles *et al.*, 2018), y no incluye el volumen de las ramas, ramillas y hojas.

Se presenta la ecuación de cuatro parámetros, cuyas variables de ajuste son la altura total (h), el diámetro normal (d), densidad (D), factor de expansión de biomasa (BEF), relación biomasa radical/biomasa total ($1 + R$), factor de conversión (FC), con base en los indicadores de bondad de ajuste (R^2 ajustada y REMC) y nivel de confiabilidad, las pruebas de normalidad de los residuales y las medidas para estimar la capacidad

predictiva del modelo, el conjunto de datos de 128 árboles de *T. grandis*. El valor de SCE (0.00399) da una expresión explícita de los coeficientes estimados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de los estadísticos de bondad de ajuste de la ecuación evaluada en la estimación de carbono almacenado en *Tectona grandis* L. f.

Modelo	R^2_{adj}	SCE	REMC	β_i	Valor Estimado	Error estándar	Prob>T
$C_{almacenado}(t) = ((\beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d \cdot h \cdot D \cdot FEB) \cdot ((1 + R) \cdot FC)$	0.82	0.00399	0.017	0	0.364129	0.1526	0.0185
				1	-0.05252	0.0187	0.0057
				2	0.002326	0.000555	<0.0001
				3	0.001067	0.00019	<0.0001

R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; SCE = Suma de cuadrado del error;
 β_i = Parámetros estimados; REMC = Raíz del cuadrado medio del error.

El modelo presenta un coeficiente de determinación ajustado de 0.82, que explica 82 % de la variabilidad total en la variable dependiente, con un valor de $RECM = 0.0179$, y una alta significancia en cada uno de sus parámetros (Cuadro 1); un valor de sesgo absoluto = 0.0082 m^3 lo cual indica que se tiene la mínima desviación del modelo con respecto a los valores observados, por lo que se considera apropiado para predecir con precisión el carbono almacenado en función del volumen fustal (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1 + R$), factor de conversión (FC).

Una vez inspeccionado el desempeño de los supuestos de la regresión en la ecuación alométrica; la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* registró un valor de 0.96 (Cuadro 2); los porcentajes de frecuencias relativas acumuladas de los residuales se asimilan a una línea recta, respecto de la probabilidad de la distribución normal, sus porcentajes tienden a formar una campana de *Gauss*.

Cuadro 2. Resultados de las pruebas de *Shapiro-Wilk*, *White* y *Durbin-Watson* de la ecuación evaluada en la estimación de carbono almacenado en *Tectona grandis* L. f.

Modelo	<i>Shapiro-Wilk</i>	Pr<W	Prueba de <i>White</i>	Pr>ChiSq	<i>Durbin-Watson</i> (DW)
$C_{almacenado}(t) = ((\beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d \cdot h \cdot D \cdot FEB) \cdot ((1 + R) \cdot FC)$	0.96	0.0682	12.99	0.1121	2.01

El resultado del estadístico *Durbin-Watson* de independencia de la frecuencia de los residuos demuestra que no hay colinealidad entre variables (Cuadro 2).

La dispersión de los residuos, respecto a los valores estimados de carbono almacenado (Figura 2) en la ecuación alométrica, no expresa certeza de insuficiencia. La prueba de *White* dio un valor de 12.99 (Cuadro 2), que no es significativo en los residuales (Pr>Chi-Sq = 0.1121), por lo que no existe evidencia estadística de heterocedasticidad.

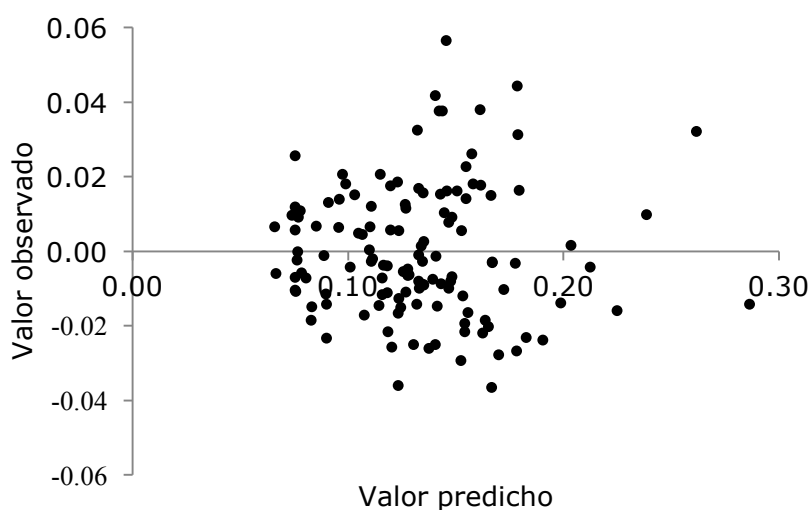


Figura 2. Distribución de residuales de la ecuación de carbono almacenado para *Tectona grandis* L. f.

Con base en lo anterior, se procedió a realizar la estimación del carbono almacenado en los árboles de la plantación forestal comercial de *T. grandis* objeto de estudio. Se calculó que cuenta con 140.37 t ha⁻¹ de biomasa, el carbono almacenado por árbol es de 0.13 t, la plantación almacena 77.20 t ha⁻¹ de carbono en 6 ha.

El resultado de la estimación de carbono es afín a lo registrado por Novoa *et al.* (2006), quienes ajustaron ecuaciones alométricas y obtuvieron una media de 72.65 t ha⁻¹ de carbono almacenado en plantaciones de *T. grandis*, a los 8 años de edad establecidas en Nayarit; difiere de Jaramillo y Correa (2015) quienes determinaron que una plantación de 14 años en la provincia de El Oro, Ecuador almacena 17.15 t ha⁻¹ de carbono; en plantaciones de EcoBosques® de Costa Rica, mediante el ajuste de ecuaciones matemáticas estimaron para distintas edades (8, 12 y 16 años) que el carbono almacenado es de 23.1 t ha⁻¹, 29.6 t ha⁻¹ y 44.5 t ha⁻¹, respectivamente. Jiménez y Landeta (2009) calcularon valores de 21.35, 25.56 y 11.42 t ha⁻¹ de carbono acumulado, en plantaciones de 8 años de edad de *T. grandis* de tres procedencias (Ecuador, Brasil, y Costa Rica) establecidas en Ecuador; por su parte Patiño *et al.* (2018) hicieron estimaciones del carbono almacenado en plantaciones con la misma especie de cinco años de edad establecida en Tolima, Colombia, y determinaron con el uso de ecuaciones alométricas que la plantación almacena 27.20 t ha⁻¹ de carbono.

La ecuación ajustada para estimar el carbono almacenado a partir de los valores de los parámetros del Cuadro 2, queda definida como:

$$C_{almacenado}(t) = ((0.364129 \pm 0.05252.d + 0.002326.d^2 + 0.001067.d.h.D.FEB) \\ . (1 + R).FC)$$

Donde:

$C_{almacenado}$ = Carbono almacenado ($t\ ha^{-1}$)

d = Diámetro normal (cm).

h = Altura total (m).

D = Densidad básica ($g\ cm^3$).

FEB = Factor de expansión de biomasa

$1 + R$ = Relación biomasa radical/biomasa total

FC = Factor de conversión

Se han realizado varios estudios para determinar el carbono almacenado a través de ecuaciones alométricas para varias especies, entre los que destaca el de López-Reyes *et al.* (2016), quienes determinaron con el ajuste de ecuaciones alométricas el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de distintas edades de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss) Müll. Arg. establecidas en Tabasco, y señalaron que el carbono varía para cada edad; en la plantación de 51 años el carbono almacenado aéreo fue de $257.07\ t\ ha^{-1}$; en la de 32 años, de $151.32\ t\ ha^{-1}$; plantación de 25 años, $121.48\ t\ ha^{-1}$; plantación de 15 años, $108.57\ t\ ha^{-1}$; plantación de 9 años, $35.79\ t\ ha^{-1}$; y la plantación de 5 años, $26.28\ t\ ha^{-1}$. Estos resultados son diferentes a los obtenidos para la plantación de *T. grandis* establecida en Michoacán, la cual almacena $77.20\ t\ ha^{-1}$, igualmente difiere con lo citado por Cámara *et al.* (2013); autores que emplearon ecuaciones para estimar el carbono almacenado en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, *Gmelina arborea* Roxb. y sabana de *Quercus oleoides* Schltdl. & Cham establecidas en Tabasco, y registraron que el carbono almacenado era de $14.75\ t\ ha^{-1}$, $15.54\ t\ ha^{-1}$ y $68.29\ t\ ha^{-1}$, respectivamente.

Los modelos para la estimación de carbono almacenado en plantaciones forestales son escasos en la literatura, así como las investigaciones en las que se determina el factor de expansión de biomasa y que consideran la biomasa radicular, debido a la

dificultad de la extracción de muestras y a los altos costos que genera esta estimación (Schlegel, 2001; Sierra *et al.*, 2001; Fonseca *et al.*, 2009). Pocos estudios han estimado los valores precisos de contenido de carbono en la biomasa de especies de interés forestal, por ello se acude a un factor de conversión de biomasa a carbono de 0.5 (Husch, 2001).

Conclusiones

La ecuación alométrica ajustada, con base en los indicadores de bondad de ajuste, las pruebas de normalidad de los residuales y las medidas para estimar la capacidad predictiva del modelo es apropiada para estimar con precisión el carbono almacenado en función del diámetro normal (d), altura total (h), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1 + R$; y factor de conversión (FC).

T. grandis almacena 77.20 t ha⁻¹ a los 11 años de edad, con una densidad de 1 666 árboles ha⁻¹.

La ecuación alométrica ajustada representa una significativa herramienta, la cual es flexible puesto que permite estimar de manera indirecta el carbono almacenado en los árboles (tiempo y costo económico), puede ajustarse a plantaciones con condiciones bioclimáticas similares.

Es factible incorporar la ecuación alométrica a los sistemas de productividad para evaluar el potencial de las plantaciones forestales comerciales como servicios ambientales a fin de mitigar las emisiones de CO₂.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias; Campo Experimental Uruapan, Michoacán por las facilidades otorgadas para la toma de datos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución por autor

Javier Jiménez Pérez: planeación de la investigación, desarrollo, análisis, procesamiento de información, estructura y redacción del documento; Ricardo Telles Antonio: planeación, desarrollo, estructura y revisión del documento; Eduardo Alanís Rodríguez: planeación de la investigación y revisión del documento; José Israel Yerena Yamallel: planeación de la investigación y revisión del manuscrito; Dora Alicia García García: estructura y revisión del documento; Martín Gómez Cárdenas: planeación y desarrollo de trabajo en campo, estructura y revisión del documento.

Referencias

Allison, P. D. 2010. Survival analysis using SAS: A practical guide. Sas Institute. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=RmbZ2y1KLwUC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Survival+analysis+using+SAS:+a+practical+guide&ots=yR5U5mLhvG&sig=0FdkydY1mLcUkiAw0TbXekyMW8I#v=onepage&q=Survival%20analysis%20using%20SAS%3A%20a%20practical%20guide&f=false> (18 de septiembre de 2018).

Álvarez, J. G., M. Barrio, U. Diéguez y A. Rojo. 2003. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales 309 (1): 303–309.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2981882>
(20 de septiembre de 2019).

Ávila, G., G. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8 (30): 32–35.

https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Jimenez9/publication/288653502_Almacenamiento_fijacion_de_carbono_y_valoracion_de_servicios_ambientales_en_sistemas_agroforestales_en_Costa_Rica/links/568a728608ae051f9afa4e52/Almacenamiento-fijacion-de-carbono-y-valoracion-de-servicios-ambientales-en-sistemas-agroforestales-en-Costa-Rica.pdf (16 de septiembre de 2018).

Barrios, A., A. M. López y V. Nieto. 2014. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia Forestal* 17(2): 137–149.

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a01>
(22 de septiembre de 2018).

Brockhoff, E. G., H. Jactel, J. A. Parrotta and F. B. Ferraz S. 2013. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management* 301: 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018> (20 de septiembre de 2018).

Cámara C., L. del C., C. Arias M., J. L. Martínez S. y O. Castillo A. 2013. Carbono almacenado en selva mediana de *Quercus oleoides* y plantaciones de *Eucalyptus urophylla* y *Gmelina arborea* en Huamanguillo, Tabasco. In: Pellat, F. P., W. G. Julio, B. Maira y V. Saynes (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013. Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Texcoco, Edo. de Méx., México.

https://www.researchgate.net/profile/Xochitl_Cruz-Nunez2/publication/263043104_42_Incendios_forestales_carbono_negro_y_carbono_organico_en_Mexico_2000_-_2012/links/0f3175399dd7314471000000/42-Incendios-forestales-carbono-negro-y-carbono-organico-en-Mexico-2000-2012.pdf
(16 de septiembre de 2018).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Bosques, cambio climático y REDD + en México Guía básica. Comisión Nacional Forestal (Conafor). Zapopan, Jal., México. [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/4034Guía Básica de Bosques, Cambio Climático y REDD_.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/4034Guía_Básica_de_Bosques,_Cambio_Climático_y_REDD_.pdf) (27 de septiembre de 2018).

Da Cunha, T. A., J. O. Vargas M. y M. Escalier H. 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Escuela de Ciencia Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. https://www.researchgate.net/profile/Thiago_Da_Cunha2/publication/236657148_Ajuste_y_seleccion_de_modelos_de_regresion_para_estimar_el_volumen_total_de_arboles_Autores_Thiago_Augusto_da_Cunha_Cochabamba-Bolivia/links/0deec518b99cc23eed000000.pdf (25 de septiembre de 2018).

De Arce, R. y R. Mahía. 2009. Conceptos básicos sobre la heterocedasticidad en el modelo básico de regresión lineal tratamiento con E-VIEWS, 20. Departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España. <http://tabarefernandez.tripod.com/dearce.pdf> (1 de septiembre de 2019).

de Camino, R. y M. J. Pierre. 2013. Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. <http://www.ibiologia.unam.mx/gela/tecalibro.pdf> (2 de septiembre de 2019).

Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques 13(1): 25-34. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2007.1311233> (20 de septiembre de 2018).

Draper, N. R. and H. Smith. 2014. Applied regression analysis. John Wiley & Sons. Danvers, MA, USA.

<https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=d6NsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=applied+regression+analysis&ots=Bxs3l7f0ON&sig=ShNoobuSz06KXudLXVzDPTuvSgc#v=onepage&q=applied%20regression%20analysis&f=false> (16 de septiembre de 2018).

Emanuelli, P. y F. Milla. 2014. Construcción de funciones de volumen. Volumen, Biomasa y Carbono Forestal Nota técnica 4. REDD/CCAD-GIZ. La Libertad, El Salvador.

http://www.reddccadgiz.org/monitoreoforestal/docs/mrv_2099067706.pdf (25 de septiembre de 2018).

Espíritu A., J. J., H. Valderrama F. y J. M. Espíritu P. 2016. Comparación de tres ecuaciones alométricas en la estimación de la biomasa arbórea y la valoración económica del secuestro de CO₂ en la parcela 8 del *arboetum* El Huayo del Ciefor Puerto Almendra, Loreto, Perú. Conocimiento Amazónico 7 (2): 107–117.

<http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/UNAP/4322> (27 de septiembre de 2018).

Fierros G., A. M. 2012. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales. A 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal (Conafor). Zapopan, Jal., México.

http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/PROGRAMA_DE_DESARROLLO_DE_PFC_A_15_ANOS_DE_SU_CREACION.PDF (25 de septiembre de 2018).

Fonseca, W., F. Alice y J. Rey V. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica.

Bosque 30(1): 36-47. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006> (20 de septiembre de 2018).

Gómez D., J. D., J. D. Etchevers B., A. I. Monterrosos R., J. Campo A. J. y J. A. Tinoco R. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente 17 (2): 261–272. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
(22 de septiembre de 2018).

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2015. Cambio climático 2014 Informe de síntesis. In: Pachauri, R. K. y L. A. Meyers (eds.). Contribución de los Grupos de trabajo I, II Y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
(27 de septiembre de 2018).

Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, 18 al 20 de octubre de 2001. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. <http://www.uach.cl/simposiocarbono/doc/Husch.PDF>
(22 de septiembre de 2018).

Instituto Nacional De Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Nuevo Urecho, Michoacán de Ocampo. Clave geoestadística 16059. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/16/16059.pdf>
(25 de septiembre de 2018).

Jaramillo S., R. M. y H. M. Correa G. 2015. Cuantificación de biomasa área total, carbono almacenado y CO₂ fijado en árboles teca (*Tectona grandis* Linn f) en una parcela de muestreo rectangular de 500 m² en una hacienda en la provincia de El Oro. In: Quezada, A. (ed.). Primer Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología UTMACH. Universidad Técnica de Machala. Provincia de el Oro, Ecuador. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/4900>
(25 de septiembre de 2018).

- Jiménez P., J., O. A. Aguirre C. y J. I. Yerena Y. 2008. Catálogo de contenido de carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México. Comisión Nacional Forestal (Conafor). Zapopan, Jal., México.
http://www.ccmss.org.mx/descargas/Catalogo_de_contenido_de_carbono_en_especies_forestales_de_tipo_arboreo_del_noroeste_de_Mexico.pdf
(23 de septiembre de 2018).
- Jiménez, E. y A. Landeta. 2009. Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperia-ESPOL.
https://www.researchgate.net/profile/E_Jimenez/publication/28795953_Produccion_De_Biomasa_Y_Fijacion_De_Carbono_En_Plantaciones_De_Teca_Tectona_Grandis_Linn_F_Campus_Prospalina_-_Espol/links/5567191908aefcb861d3807f.pdf
(25 de septiembre de 2018).
- Keogh, R. M. 2013. La teca y su importancia económica a nivel mundial. 2013. *In*: Camino, R. y M. J. Pierre. (eds.). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Ed. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. <http://www.ibiologia.unam.mx/gela/tecalibro.pdf>
(2 de septiembre de 2019).
- Kongsager, R., J. Napier and O. Mertz. 2013. The carbon sequestration potential of tree crop plantations. *Mitigation and Adaptation Strategies Change* 18 (8): 1197–1213. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9417-z> (20 de septiembre de 2018).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2016. NOAA's annual greenhouse gas index. Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division, NOAA. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi.html>
(27 de septiembre de 2018).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2019. Trends in atmospheric carbon dioxide. Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division, NOAA. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
(5 de septiembre de 2019).

Langenberger, G. and J.-X. Liu. 2013. Performance of smallholder teak plantations (*Tectona grandis*) in Xishuangbanna, South-West China. *Journal of Tropical Forest Science* 25 (3): 289–298. <https://www.jstor.org/stable/23617231>

(18 de septiembre de 2018).

Le Quéré, C., R. M. Andrew, J. G. Canadell, S. Sitch, J. I. Korsbakken, G. P. Peters and S. Zaehle. 2016. Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data* 8 (2): 605–649. <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016> (26 de septiembre de 2018).

López-Reyes, L. Y., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi, J. Zavala-Cruz, A. Gómez-Guerrero y S. Posada-Cruz. 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg) de diferentes edades. *Madera y Bosques* 22 (3): 49–60.

<http://dx.doi.org/10.21829/myb.2016.2231456> (19 de septiembre de 2018).

López, G. H., E. Vaides E. y A. Alvarado. 2018. Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* 42 (1): 137–153.

<https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v42n1/0377-9424-ac-42-01-137.pdf>

(24 de septiembre de 2018).

Louppe, D. and G. Mille. 2015. *Mémento du forestier tropical*. Editions Quæ. Paris, France <http://www.quae.com/fr/r4730-memento-du-forestier-tropical.html>

(25 de septiembre de 2018).

MacDicken, K. G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. https://www.researchgate.net/publication/237434580_A_Guide_to_Monitoring_Carbon_Storage_in_Forestry_and_Agroforestry_Projects/link/560550ad08ae8e08c08bbad7/download (25 de septiembre de 2018).

- Montero, M. y M. Kanninen. 2006. Carbono fijado a diferentes edades en plantaciones de *Terminalia amazonia*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. Revista Recursos Naturales y Ambiente 45: 112-119.
<http://www.sidalc.net/repdoc/A11537e/A11537e.pdf> (21 de septiembre de 2018).
- Norverto, C. A. 2006. La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina. Editorial GRAM. Buenos Aires, Argentina.
<https://doi.org/10.1177/1545968312437940> (25 de septiembre de 2018).
- Novoa L., A., A. M. Gaspar P., B. Parada S. y A. Gallegos R. 2006. Estimación del potencial de fijación de carbono por dos métodos en plantaciones forestales comerciales de *Tectona grandis* L. f., en Bahía de Banderas, Nayarit. In: XVII Semana de la Investigación Científica. Avances en la Investigación Científica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara, Jal., México. pp. 127-132.
http://www.cucba.udg.mx/sites/default/files/publicaciones1/avances/avances_2005/Agronomia/NovoaLeyvaIsmael/NovoaLeyvaIsmael.pdf (27 de septiembre de 2018).
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45 (4): 573–593.
<http://www.sidalc.net/repdoc/A11144i/A11144i.pdf> (24 de septiembre de 2018).
- Patiño F., S., L. N. Suárez S., H. J. Andrade C. y M. A. Segura M. 2018. Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental 9(2):122-133. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312> (15 de enero de 2019).
- Picard N., L. Saint A. y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Cirad. FAO. Roma, Italia.
<http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf> (25 de septiembre de 2018).

Schlaegel, B. E. 1982. Notes: Boxelder (*Acer negundo* L.) Biomass Component Regression Analysis for the Mississippi Delta. *Forest Science* (28): 355–358.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/28.2.355> (23 de septiembre de 2018).

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. *In*: J. Gayoso (ed.). *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. pp. 1–13. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006> (18 de septiembre de 2018).

Segura, M. y H. J. Andrade. 2008. Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas (CATIE)* 46:89-96. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=084307> (16 de septiembre de 2018).

Sierra, C. A., J. Del Valle. y S. A. Orrego. 2001. Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia. *In*: Gayoso, J. (ed.). *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.04.013> (18 de septiembre de 2018).

Tedeschi, L. O. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* 89 (2–3): 225–247.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2005.11.004> (16 de septiembre de 2018).

Telles, A. R., J. A. Nájera L., E. Alanís R., O. A. Aguirre C., J. Jiménez P., M. Gómez C. y H. J. Muñoz F. 2017. Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8 (40): 37–56.
<https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.35>. (23 de septiembre de 2018).

Telles, A. R., M. Gómez C., E. Alanís R., O. A. Aguirre C. y J. Jiménez. 2018. Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen total fustal de *Tectona grandis* en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y Bosques* 24: (3). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431544> (23 de septiembre de 2018).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.