

NOTA TÉCNICA

**FUNCIONES DE BIOMASA Y CARBONO AÉREO
APLICABLES A ÁRBOLES DE *PINUS
PSEUDOSTROBUS* LINDL. EN MÉXICO****Efraín Velasco Bautista, Enrique Romero Sánchez, Antonio González Hernández, Francisco Moreno Sánchez y Ramiro Pérez Miranda**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID COMEF). Avda. Progreso 5. Col. Barrio de Santa Catarina. Delegación Coyoacan. 04010-MEXICO DISTRITO FEDERAL (México). Correo electrónico: velasco.efrain@inifap.gob.mx

Resumen

El CO₂ es el principal gas responsable del efecto invernadero, provocando incremento en la temperatura. La vegetación actúa como sumidero de CO₂ al extraer este gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis y acumular en sus tejidos el carbono fijado, permitiendo la creación de biomasa en diferentes estructuras: raíces, ramas, hojas y troncos. Los tomadores de decisiones en el sector ambiental-forestal se interesan en conocer el carbono aéreo almacenado en los ecosistemas forestales, para lo cual el primer nivel de estimación que debe considerarse es el árbol. Tradicionalmente, y de manera práctica, para este último fin se utilizan modelos de regresión que consideran como variable dependiente el carbono (o la biomasa) y como variable independiente el diámetro normal; aun cuando se postula que la inclusión de altura del árbol mejora fuertemente la precisión de la estimación. En este trabajo se generó una ecuación de biomasa y otra de carbono para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región central de México. Se demuestra, desde un punto de vista estadístico, empleando como criterio el Cuadrado Medio del Error, que efectivamente la altura en combinación con el diámetro normal, es un buen predictor de la biomasa y del carbono total del árbol.

Palabras clave: *Modelos alométricos, Variable combinada, Modelos no lineales, Biomasa total, Pinus pseudostrobus Lindl.*

INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: la reducción de emisiones antropogénicas de CO₂ y la creación y mejoramiento de los sumideros de carbono en la biósfera.

La vegetación actúa como sumidero de CO₂, al extraer este gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis que a su vez está regulada por la dis-

ponibilidad de agua y nutrientes, y acumular en sus tejidos el carbono fijado permitiendo la creación de biomasa (raíces, ramas, hojas y troncos). Por otra parte, las plantas aportan materia orgánica transfiriendo C al suelo por diferentes vías, las más importantes son la hojarasca, los exudados y la transferencia de carbono a los organismos que están asociados simbióticamente con las raíces (BONAN, 2002; ANDRADE Y MUHAMMAD, 2003).

El potencial en los ecosistemas en el secuestro de carbono se define por el tipo y la condición del hábitat, es decir, por la composición de especies, la edad, los procesos de producción primaria bruta, producción primaria neta del ecosistema, las características geográficas del sitio y por el grado de fragmentación. La capacidad de almacenamiento de una reserva está determinada por la cantidad de biomasa aérea y subterránea que contiene, tal cantidad depende del clima, la fertilidad, la disponibilidad de agua y del régimen de perturbación (DALE, 1994; TERRADAS, 2001).

En el ámbito internacional se han iniciado estrategias para la mitigación del calentamiento global como las negociaciones de créditos de carbono. Para hacer realidad estas estrategias en proyectos forestales es necesario medir y monitorear el carbono almacenado en los ecosistemas forestales, especialmente en el compartimiento de biomasa arriba del suelo (aérea), para lo cual el primer nivel de estimación que debe considerarse es el árbol. Tradicionalmente, y de manera práctica, para este último fin se utilizan modelos de regresión que consideran como variable dependiente el peso de carbono (o de biomasa) y como variable independiente el diámetro normal; aun cuando se postula que la inclusión de altura del árbol mejora fuertemente la precisión de la estimación.

En México y a nivel internacional, varios investigadores han generado ecuaciones de biomasa y carbono, tanto en coníferas como en latifoliadas. La forma funcional comúnmente empleada es la siguiente:

$$y_1 = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_k^{\beta_k} \quad (1)$$

donde:

y: Carbono o biomasa.

x: Variables independientes.

Las variables independientes comúnmente se refieren al diámetro normal, la altura total o una combinación de ambas.

Las ecuaciones generadas por ACOSTA-MIRELES et al. (2002) para calcular biomasa aérea total de varias especies de forestales del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino en Oaxaca, México, son ejemplos en las que el diámetro normal es la única variable predictora. Los coeficientes de determinación en este caso fueron superiores al 0,97. RODRÍGUEZ et al. (2006) también generaron modelos alométricos para estimar la biomasa aérea individual a partir únicamente

del diámetro normal en especies dominantes del bosque de niebla al sur de Tamaulipas, México. Las R^2 fueron alrededor del 0,95. PACHECO et al. (2007) estimaron la biomasa aérea total de *Pinus greggii* Engelm a partir de la variable combinada diámetro-altura en una plantación de seis años de edad en Hidalgo, México. El coeficiente de determinación fue de tan sólo de 0,88. Aunque, la variable combinada no se usó estrictamente como se señaló en la ecuación (1).

Aun cuando en la mayoría de los modelos para estimar biomasa o carbono se considera sólo el diámetro normal como variable independiente; se postula que la inclusión de la altura total del árbol mejora de manera significativa la precisión de la estimación, ya que esta variable es de uso frecuente para diferenciar condiciones de crecimiento en sitios diferentes, y sirve comúnmente como base para expresar el índice de sitio para propósitos de planeación de manejo forestal (CIENCIALA et al., 2008).

Por lo anterior, en este trabajo se presenta una ecuación de biomasa y una de carbono para *Pinus pseudostrobus*, en las cuales se muestra desde el punto de vista estadístico, empleando como criterio el Cuadrado Medio del Error, que la inclusión de la altura total en combinación con el diámetro normal del árbol es una variable que efectivamente mejora la precisión de la estimación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar el contenido de carbono en los árboles de *Pinus pseudostrobus* se empleó la metodología sugerida por ACOSTA-MIRELES et al. (2002) y AVENDAÑO et al. (2009). Los datos de campo se tomaron en el Estado de México, México. La integración de la muestra representativa de la población arbórea de *Pinus pseudostrobus* consideró 18 categorías diamétricas de cinco centímetros cada una, la inferior fue de 10 y la superior de 95 cm. Se utilizaron 31 árboles para generar los modelos de biomasa y carbono. Previo al derribo del árbol, se midió el diámetro normal (cm) y la altura total (m). El fuste se seccionó en trozas de 2,54 m, y para cada una se registró el diámetro de sus extremos (cm) y su longitud (m). De la parte inferior de cada troza se obtuvo de manera sistemática una rodaja de 5 cm

de espesor, la cual se le registró el peso (kg) y el diámetro (cm). El volumen de las ramas se obtuvo mediante la metodología de cubicación de madera apilada. En cada pila se colectaron cinco ejemplares de ramas (50 cm), cada uno se cubió y pesó en verde (kg). El follaje de los árboles estudiados, incluyendo los de categorías diamétricas superiores, se colectó y se pesó completamente. Se tomaron cinco porciones del follaje distribuidas a lo largo de la copa del árbol, cada una se le registró su peso verde.

Todas las rodajas y las muestras de ramas se colocaron en invernadero por dos meses a fin de que logaran su peso seco. Las muestras del follaje permanecieron en una secadora durante dos meses. Muestras de rodajas, ramas y follaje se les determinó el carbono mediante un analizador de carbono. La biomasa de las trozas se obtuvo considerando el peso seco de la rodaja. La biomasa aérea total del árbol se obtuvo como la suma de la biomasa del fuste, ramas y hojas. El contenido de carbono de las trozas se determinó multiplicando su valor de biomasa (kg) por la proporción de carbono obtenida en laboratorio; de manera similar se procedió para las ramas y el follaje.

Se evaluaron tres tipos de modelos de modelos no lineales de uso común en el ámbito forestal (VELASCO *et al.*, 2007; KÖHL *et al.*, 2010): potencial, variable combinada logarítmica y Schumacher-Hall. La biomasa y el carbono se consideraron como las variables dependientes y el diámetro normal y la altura total, en diferentes modalidades, como las independientes. En el primero se consideró como variable independiente sólo el diámetro normal (m), en el segundo el producto del diámetro normal al cuadrado (m^2) por la altura total (m) y en el tercero, el diámetro normal (m) y la altura total (m). Los parámetros de estos modelos se estimaron mediante el PROG NLIN de SAS (MARTÍNEZ Y MARTÍNEZ,

2002), por lo que el término de error se consideró aditivo (SIT & POULIN-COSTELLO, 1994).

RESULTADOS

El diámetro normal de los 31 árboles muestreados osciló de 8,5 a 94,2 cm, su altura de 15 a 43,6 m y su biomasa total de 57,59 a 5.527 kg, mientras que el carbono total por árbol varió de 28,54 a 2.832,83 por árbol. La correlación entre el volumen del fuste y la biomasa total fue de 0,97, lo que indica que tan sólo con la cubicación del fuste se podría predecir la biomasa del árbol. No obstante, que la determinación del volumen del fuste es un proceso costoso y tardado, se estima muy bien cuando se incluye el diámetro normal al cuadrado por la altura total del árbol. La correlación entre el diámetro normal y la altura total con la biomasa total fue 0,90 y 0,86, respectivamente. Por lo que estas variables, se consideran buenas predictoras de la biomasa y del carbono total del árbol. En todos los casos, las correlaciones resultaron altamente significativas ($p < 0,05$).

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados del análisis estadístico para la estimación de biomasa y carbono. Se presentan, respectivamente, los modelos potencial, de la variable combinada logarítmica y el Schumacher-Hall.

Los tres modelos analizados, tanto para biomasa como para carbono, cumplen con el supuesto de normalidad, puesto que en todos los casos, el valor de p correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilks es mayor a 0,05, de manera particular, se observa un valor alto de p en el modelo que considera en forma separada el diámetro normal y la altura total. Si bien es cierto que los tres modelos presentan una dispersión de residuales en forma de embudo, en los modelos que consideran el diámetro normal y la altura

Modelos	CME	Fcal	Prob F	Pseudo R ²	DR	W	Prob W
$\hat{B} = 7.027,00 (DN)^{2,1914}$	444,380.00	235,16	<,0001	0,869852	Embudo (DT=654.71667)	0,951992	0,1771
$\hat{B} = 229,50 (DN^2H)^{0,9256}$	232,464.00	462,76	<,0001	0,931917	Embudo (DT=474.03141)	0,952131	0,1787
$\hat{B} = 68,2662 DN^{1,6848} H^{1,2468}$	225,693.00	318,39	<,0001	0,936180	Embudo (DT=458.91940)	0,968032	0,4666

Tabla 1. Estadísticos de bondad de ajuste y de normalidad para los modelos evaluados para biomasa. CME: Cuadrado Medio del Error, Fcal: Valor de F calculada, Prob F: Probabilidad exacta de F, Pseudo R²: Pseudo coeficiente de determinación, DR: Dispersión de los residuales, DT: Desviación típica de los residuales, W: Estadístico de Shapiro-Wilks y Prob W: Probabilidad de W

Modelos	CME	Fcal	Prob F	Pseudo R ²	DR	W	Prob W
$\hat{C} = 3.553,1 (DN)^{2,2245}$	109.555	239,41	<,0001	0,872982	Embudo (DT=325,12000)	0,94806	0,1380
$\hat{C} = 110,20 (DN^2H)^{0,9392}$	58.101,4	464,27	<,0001	0,932637	Embudo (DT=236,99069)	0,951486	0,1715
$\hat{C} = 37,6376 DN^{1,7317}H^{1,2239}$	57.230,30	314,70	<,0001	0,935935	Embudo (DT=231,08285)	0,969951	0,5177

Tabla 2. Estadísticos de bondad de ajuste y de normalidad para los modelos evaluados para carbono. CME: Cuadrado Medio del Error; Fcal: Valor de F calculada, Prob F: Probabilidad exacta de F, Pseudo R²: Pseudo coeficiente de determinación, DR: Dispersión de los residuales, DT: Desviación típica de los residuales, W: Estadístico de Shapiro-Wilks y Prob W: Probabilidad de W

total la amplitud del embudo (medida como la desviación típica de los residuales) es casi un 30% menor en comparación con el modelo que considera sólo el diámetro normal. Los valores de p correspondientes a la prueba de F indican que de manera global en los tres modelos al menos uno de los parámetros es distinto de cero, sin embargo, las pruebas de hipótesis para los parámetros individuales señalan que para el tercer modelo puede ser igual a cero, ya que el valor de p de la prueba de t es mayor a 0,05. El intervalo de confianza al 95% confirma este hecho.

Los modelos que incluyen como variables independientes al diámetro normal y la altura total presentan un Cuadrado Medio del Error menor, de casi el 50%, en relación al modelo que considera únicamente el diámetro normal. Los modelos que consideran la altura total y el diámetro normal tienen una pseudo R² mayor respecto al que toma en cuenta sólo el diámetro normal; este incremento es de casi un 7% en el caso de biomasa y del 6% en carbono. Sin embargo, el modelo que considera separadamente al diámetro normal y la altura total presenta la dificultad que el parámetro puede ser igual a cero, por lo tanto, el modelo que estima la biomasa y el carbono en función del producto diámetro normal al cuadrado por la altura, de la variable combinada logarítmica, es el que mejor se ajusta al conjunto de datos estudiado.

CONCLUSIONES

Con datos de *Pinus pseudostrobus* obtenidos en la región central de México, se demostró estadísticamente que la altura total en combinación con el diámetro normal es un buen predictor de la biomasa y del carbono total por árbol. Ambas variables se registran en los inventarios forestales convencionales.

El modelo que incluye el diámetro normal y la altura total, tanto para la estimación de la biomasa y el carbono por árbol, supera significativamente el modelo que incluye sólo el diámetro normal. En ambos casos el Cuadrado Medio del Error, se reduce en aproximadamente un 50%. Este resultado es superior al obtenido por CIENCIALA et al. (2008) para *Quercus robur* y *Quercus petraea* en Europa-Central. Estos autores obtienen una reducción del Cuadrado Medio del Error (unidades logarítmicas) del 30%. Esta poca ganancia en precisión puede ser atribuida al tipo de especies que se evaluaron.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA-MIRELES, M.; VARGAS-HERNÁNDEZ, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, A. Y ETCHEVERS-BARRA, J.D.; 2002. Estimación de Biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- ANDRADE, J.H. Y MUHAMMAD, I; 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agrofostería en las Américas* 10(39-40): 109-116.
- AVENDAÑO, H.D.M.; ACOSTA-MIRELES, M.M.; CARRILLO, A.F. Y ETCHEVERS-BARRA, J.D.; 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnica Mexicana* 32(3): 233-238.
- BONAN, G.; 2002. *Ecological climatology concepts and applications*. Cambridge University Press Cambridge. Cambridge.
- CIENCIALA E.; APLTAUER, J.; EXNEROVÁ Z. & TATARINOV, F.; 2008. Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. *J. For. Sci.* 54(3): 109-120.
- DALE, V.H.; 1994. *Effects of Land Use Change on Atmospheric CO₂ Concentrations: South and*

- Southeast Asia as a Case Study*. Springer-Verlag. N.Y., USA. Department of Agriculture. Investigations Report no. 42 version 3.0 Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. January. 102 p.
- KÖHL, M.; MAGNUSSEN, S.S. & MARCHETTI, M.; 2010. *Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory*. Springer. Lexington.
- MARTÍNEZ, G.A. Y MARTÍNEZ, D.M.A.; 2002. *Introducción a los métodos econométricos*. Grupo Editorial Sagitario. Texcoco, Estado de México.
- PACHECO, E.F.C.; ALDRETE, A.; GÓMEZ, G.A.; FIERROS, G.A.M.; CETINA A.V.M. Y VAQUERA, H.H.; 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Fitotecnia Mexicana* 30(3): 251-254.
- RODRÍGUEZ, L.R.; JIMÉNEZ, P.J.; AGUIRRE, C.O.A. Y TREVIÑO, G.E.J.; 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencias UANL IX* (2):179-187.
- SIT, V. & POULIN-COSTELLO, M.; 1994. *Catalogue of curves for curve fitting*. Biometrics information Handbook Series. Handbook No. 4. Series Editors W. Bergerud y V. Sit. Ministry of Forests Research Program. Forest Science Research Branch. Ministry of Forests. Victoria, B.C. Canada.
- TERRADAS, J.; 2001. *Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- VELASCO, B.E.; MADRIGAL, H.S.; VÁZQUEZ, C.I.; MORENO, S.F. Y GONZÁLEZ, H.A.; 2007. Tablas de volumen con corteza para *Pinus douglasiana* y *Pinus pseudostrobus* del Sur-Occidente de Michoacán. *Rev. Cien. For. México* 32(101): 93-115.