

Aplicación de modelos en plantaciones forestales comerciales para estimar la regeneración natural de candelilla

Application of models in commercial forest plantations to estimate natural candelilla regeneration

Antonio Cano-Pineda¹, Adrián Hernández-Ramos¹, Julio César Ríos-Saucedo^{2*}, Xavier García-Cuevas³,
E. Edith Villavicencio-Gutiérrez¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Saltillo.

² INIFAP Campo Experimental Valle de Guadiana

³ INIFAP-Campo Experimental Chetumal.

*Autor para correspondencia: j_riossaucedo@hotmail.com

RESUMEN

La candelilla es una planta con un gran potencial ya que su cera es extraída debido a sus diversas aplicaciones en las industrias, la recolección es una de las actividades más importantes en zonas rurales del país. Mundialmente es un recurso muy demandado, y México al ser el único país exportador, presenta problemas de explotación de este recurso. Para mitigar el problema de sobre cosecha, se deben implementar medidas de conservación y recuperación de poblaciones naturales. La producción de biomasa de candelilla es un indicador que puede indicar la situación actual de la especie, tanto para inventarios forestales como para plantaciones forestales comerciales destinadas a la recuperación y conservación del recurso, siendo la masa regenerada el principal parámetro a evaluar. La utilización de modelos alométricos son de gran utilidad debido a que tienen un costo bajo y pueden reducir el sesgo utilizando parámetros que pueden ser fácilmente medibles. Se tomaron muestras aleatorias de una plantación forestal comercial donde se mide la altura y el diámetro de cada individuo, se realizó un análisis estadístico mediante la implementación de 4 modelos alométricos. El modelo que presentó mejor ajuste fue el segundo, donde se obtuvo una correlación de las variables involucradas de 0.9602. la utilización de estos modelos, permiten reducir el sesgo del potencial foliar.

Palabras clave: Alométrico, Biomasa, Correlación.

ABSTRACT

The candelilla is a plant with great potential since its wax is extracted due to its various applications in industries, harvesting is one of the most important activities in rural areas of the country. It is a highly demanded resource worldwide, and Mexico, being the only exporting country, presents problems of exploitation of this resource. To mitigate the problem of overharvesting, conservation measures and recovery of natural populations must be implemented. Candelilla biomass production is an indicator that can indicate the current situation of the species, both for forest inventories and for commercial forest plantations aimed at the recovery and conservation of the resource, with regenerated mass being the main parameter to be evaluated. Random samples were taken from a commercial forest plantation where the height and diameter of each individual were measured, a statistical analysis was performed by implementing 4 allometric models. The model that presented the best fit was the second, where a correlation of the variables involved was obtained of 0.9602. the use of these models allows to reduce the bias of the foliar potential.

Keywords: Allometric, Biomass, Correlation.

INTRODUCCIÓN

La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) es una planta propia del matorral xerófilo encontrada en las zonas áridas del norte México. El principal subproducto que se obtiene de la candelilla es la cera, y este representa uno de los 10 productos no maderables de mayor importancia para el país (CONAFOR, 2006); la recolección de candelilla es una de las actividades con más relevancia en comunidades rurales, ya que la cera es un recurso que es de gran valor para la industria, ya que de gran parte de su producciones es destinada a la exportación, siendo este país el único exportador del mundo (Instituto de la candelilla, 2018; Canales *et al.*, 2006). La cera de candelilla se ha usado desde los años 1900, sin embargo, la extracción masiva de la misma comenzó a generar problemas a partir de 1936 donde los sectores socioeconómicos, comerciales, culturales y agronómicos se vieron afectados (Esquivel, 1979), y esto es debido a que, al ser un producto tan valioso, su extracción se ve cada vez más demandada mundialmente (Instituto de la candelilla, 2018). Dichos problemas pueden ser mitigados mediante la implementación de plantaciones comerciales, ya que entre sus beneficios, destacan principalmente la generación de biomasa en un medio controlado, así como la creación de fuentes de empleo en el área y el valor agregado que se le da a los subproductos principalmente de la cera de candelilla (Hernández-Zaragoza *et al.*, 2019). Ante el intensivo aprovechamiento de la candelilla, la conservación y recuperación de las poblaciones naturales es un aspecto importante de atender, por lo que las herramientas técnicas aplicadas a los estudios de inventario cobran cada vez más importancia.

Dada la continua explotación de recursos y el continuo del cambio climático, es cada vez más importante desarrollar y adoptar técnicas sostenibles que se adapten a los nuevos esquemas sociales y ambientales de producción de la biomasa para mejorar las condiciones de las especies que continuamente se ven afectadas por la sobreexplotación. Las tecnologías verdes que se implementan en el manejo forestal de especies, se encuentran entre las estrategias más eficaces para reducir el creciente impacto negativo y satisfacer la materia prima necesaria en las diversas industrias. Actualmente la biomasa es una gran fuente de recursos para muchos países sobre todo en aquellos que se encuentran en vías de desarrollo como México, actualmente se debe promover una

agricultura sostenible y una economía con una base más sólida (Antar *et al.*, 2021) sobre todo en recursos que son altamente explotados como lo es la candelilla. Actualmente la cuantificación de biomasa es empleada como indicador para evaluar la productividad del sitio forestal en plantaciones comerciales forestales de candelilla, además, juega un papel importante en el manejo forestal sostenible del recurso (Návar-Cháidez, 2010; Ferrere *et al.*, 2014). Existen diversos métodos que se utilizan para estimar el peso de la biomasa entre los que destacan los métodos directos e indirectos (Aristizábal, 2011), en estos últimos se utilizan modelos matemáticos a partir de datos que se obtienen a partir de variaciones anatómicas fisiológicas de la planta creando con ello un modelo matemático conocido como modelo alométrico dichos modelos permiten la estimación con una gran precisión de la biomasa en plantaciones forestales y áreas extensas (Solano *et al.*, 2014; Flores *et al.*, 2018). La cuantificación de la biomasa es complicada debido a los parámetros que se deben considerar al momento de realizar su medición, sin embargo, la ventaja de la utilización de modelos matemático radica en el bajo costo de aplicación y en la utilización de variables que estén al alcance directamente en las bases de datos de inventarios forestales (Solano *et al.*, 2014).

La utilización de ecuaciones sobre datos de plantaciones por lo general debe realizarse mediante un muestreo destructivo del individuo, esto es debido a que la cantidad de biomasa puede variar por las condiciones de crecimiento en las que se desarrolla la especie. A pesar de ello, se sabe que la utilización de los modelos permite reducir drásticamente el sesgo al muestrear el área (Douterlungne *et al.*, 2013). Para la obtención de una buena estimación de biomasa, las ecuaciones alométricas deben desarrollarse acorde al área a analizar, así como la naturaleza de la especie, ya que existen parámetros que podrían limitar un ajuste global para todas las especies, y esto es debido a que existen factores externos que podrían no ser aplicables al análisis de las especies en general (Solano *et al.*, 2014). Es importante contar con ecuaciones específicas para cada especie y cada sitio de muestreo (Carrillo *et al.*, 2014).

El objetivo del presente proyecto fue evaluar diferentes modelos alométricos, para identificar el que tenga un mejor ajuste en la estimación de la regeneración natural de biomasa de candelilla (Bv kg) en poblaciones naturales distribuidas en el centro y sur de Coahuila.

MATERIALES Y METODOS

Toma de muestras

A partir de un muestreo sistemático aleatorio, fueron distribuidas 30 unidades de muestreo (UM), todas georreferenciadas. Las unidades de muestreo fueron seleccionadas de forma rectangular y con una superficie de 300 m²; en ellas se realizaron muestreos selectivos de forma destructiva cosechando tallos de candelilla con una altura no mayor a 25 cm, debido a que estos son considerados como regeneración por la NOM-018-RECNAT-1999, 1999. La muestra se conformó de 498 pares de datos considerando la altura y diámetro de individuos distribuidos de tal forma que se abarquen la mayor variabilidad de tamaños; a cada uno de los tallos colectados se les midió su altura total (At, cm) y su diámetro (D, mm), además se les registro el peso en gramos con una balanza marca Ohaus con precisión de 0.001 gr.

Análisis estadístico

Previo a cualquier análisis los datos fueron depurados, eliminado aquellos valores repetitivos o que sean atípicos a la muestra, mediante análisis gráfico y cotejo de la base de datos. Para el ajuste se emplearon cuatro modelos los cuales según la literatura son los más aptos para estimar la biomasa de especies arbustivas y arbóreas entre las cuales se encuentra la candelilla, (Hernández-Ramos et al., 2017; Villavicencio-Gutiérrez et al., 2018) (Tabla 1). La altura total y el diámetro fueron registrados como variables independientes, se ajustaron los modelos para estimar peso verde mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios utilizando PROC MODEL en el software SAS 9.3 © (SAS, 2017). Para la elección del mejor modelo se consideró el mayor valor del coeficiente de correlación ajustado (R²_{aj}), el menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y la

significancia de sus parámetros; además se corroboró el cumplimiento de los supuestos de regresión. Con el mejor modelo se estimaron los valores predichos del peso verde y se graficaron para observar su ajuste en la dispersión de los datos observados.

Tabla 1. Modelos alométricos para estimar el peso verde de candelilla en plantaciones forestales comerciales en Coahuila.

Modelo	Estructura del modelo
1	$PV = \beta_0 \cdot (D \cdot At)$
2	$PV = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot At^{\beta_2}$
3	$PV = \beta_0 \cdot (D \cdot At)^{\beta_1}$
4	$PV = (D^2 \cdot At) / (\beta_1 + \beta_2 \cdot D)$

PV: peso verde (gr); β_i : parámetros del modelo; D: diámetro; At: altura total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los gráficos de dispersión indicaron que las variables de altura y diámetro se encuentran altamente correlacionadas con el peso de biomasa de la candelilla (Figura 1), por ello, fueron empleadas para el ajuste de los modelos. En el cuadro 2 se muestran los valores estadísticos de ajuste de los modelos alométricos probados para estimar el peso verde de la regeneración de candelilla. Se observa que entre los modelos destaca el modelo número 2, presentando una R²_{aj} del 0.9602, superior a 0.95, el RCME más bajo (0.12) y significancia en todos sus parámetros ($p \leq 0.001$); supuestos de regresión se cumplieron, donde el estadístico de Shapiro-Wilk muestra que existe normalidad de los residuales ($W=0.92$) y el test de Durbin Watson indica que no existen variables que son colineales por lo tanto no existe interferencia entre las mismas; adicionalmente la prueba de White indico la homogeneidad de varianza $p \leq 0.001$ (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos para estimar el peso verde de candelilla en plantaciones forestales comerciales en Coahuila.

Modelo	RCME	R ² aj	DW	W	Parámetro	Estimador	Pr > t
1	0.1477	0.9444	1.503	0.92	B0	0.006929	0.0001
2	0.125	0.9602	1.503	0.92	B0	0.011184	0.0001
					B1	1.471981	0.0001
					B2	1.091052	0.0001
3	0.1473	0.9448	1.52	0.92	B0	0.007905	0.0001
					B1	0.975491	0.0001
4	0.1314	0.956	1.533	0.9	B0	73.06645	0.0001
					B1	18.12298	0.0001

RCME: raíz del cuadrado medio del error; R²aj: coeficiente de determinación ajustado; DW: estadístico de Durbin Watson; W: estadístico de Shapiro-Wilk; Pr > |t|: significancia de los parámetros del modelo.

Gráficamente se puede observar en la Figura 1, que el modelo que se adapta mejor a la estimación del peso verde de la cosecha fue el modelo 2, el cual tiene un factor de correlación de datos observados con los correlacionados del 0.9602, lo cual indica que es la estimación más adecuada dada por los modelos establecidos.

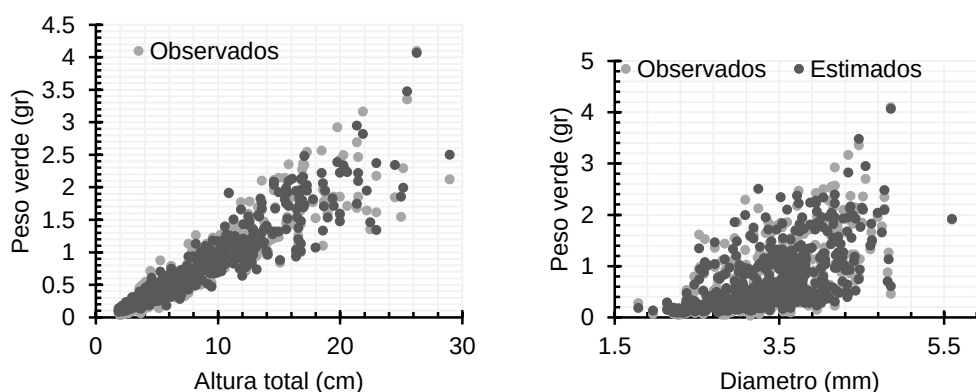


Figura 1. Valores observados y estimados de peso verde (gr) de regeneración de candelilla contra las variables altura total y diámetro.

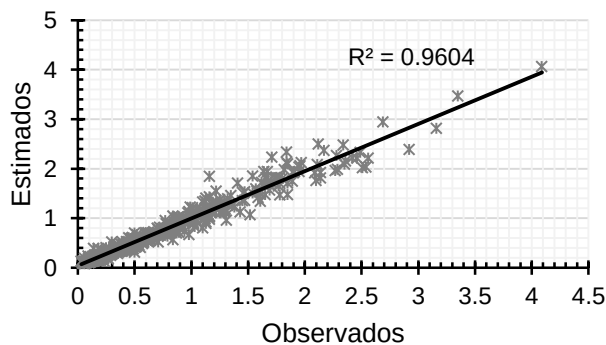


Figura 2. Valores predichos contra observados de peso verde de regeneración de candelilla.

Dichos valores muestran una tendencia lineal (Figura 2.) gracias a ello se confirma que la estimación de peso verde coincide en gran medida con los valores que fueron estimados.

(Jiménez et al., 2018) menciona que los modelos alométricos son una excelente técnica para predecir biomasa siempre y cuando el modelo que se utilice sea óptimo para los datos obtenidos, esto se puede corroborar con la correlación que existe entre los datos (R^2), siendo la implementación de modelos de una sola vía una herramienta útil para sitios con muestreos significativamente representativos del sitio y con presencia de mediciones tanto de altura como de diámetro.

En estudios similares se encontró que el diámetro promedio, la altura y la interacción entre ellas, presentaban una alta correlación con la biomasa foliar seca de algunas especies, en el caso de la candelilla, fue reportado por Hernández et al. en el 2019 donde éste presenta una correlación significativa entre el peso de la biomasa verde, el diámetro medio de cobertura y el diámetro medio basal, lo que podría significar que los parámetros físicos que se pueden describir de un individuo, pueden ser un indicativo preciso para la cuantificación de parámetros como el peso de biomasa verde y regeneración natural. El modelo que fue utilizado por Villavicencio et al. (2018), en este estudio para la estimación de la regeneración foliar de candelilla, se ha utilizado anteriormente con éxito para cuantificar la masa foliar seca de orégano en regiones de Coahuila, con una correlación entre sus valores de un 81%, y también ha sido utilizado para la estimación de peso verde

en poblaciones naturales de candelilla en el desierto de Coahuila, donde el coeficiente de correlación fue de hasta un 92% (Hernández et al., 2019).

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se demostró que los modelos utilizados tomaron relevancia por su potencial utilidad para describir la regeneración foliar en plantaciones forestales de candelilla tendiendo una correlación entre los datos estimados con los datos observados de un 96%.

En este tipo de estudios, el ajuste del modelo depende de factores como la naturaleza de la muestra y su distribución, para este caso el modelo con un mejor ajuste fue el 2, esto permite realizar evaluaciones más precisas y con un sesgo mínimo del potencial foliar a futuro de la candelilla en zonas con plantaciones forestales de esta especie y por lo tanto mejorar a gran escala el manejo forestal de recursos no maderables, trayendo beneficios a futuro a los potenciales productores

LITERATURA CITADA

- Antar, M., Lyu, D., Nazari, M., Shah, A., Zhou, X., & Smith, D. L. (2021). Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110691. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110691>
- Canales G., E., V. Canales M., y E. M. Zamarrón. 2006. Candelilla, del desierto mexicano hacia el mundo. *Biodiversitas* 69:1-5.
- Carrillo, F., Acosta, M., Flores, E., Juárez, J. E. y Bonilla, 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.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. La Candelilla.

- http://www.conafor.gob.mx/revista_forestal/vol207
- Douterlungne, D., Ferguson, B. G., Soto-Pinto, L., Herrera-Gorocica, A. M., & Siddique, I. (2013). Allometric equations used to estimate biomass and carbon in four neotropical tree species with restoration potential. *Agrociencia*, 47(4), 385–397.
- Esquivel W., M. 1979. "Candelilla" (*Euphorbia antisiphilitica*). Estudio monográfico. Tesina Biólogo. UANL. Facultad de Ciencias Biológicas. Linares, NL. México. 108 p.
- Ferrere, P., Lupi, A. M. y Boca, R. T. (2014). Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Rev. Ciencias Forestales-Quebracho*, 22(1), 100-113.
- Flores, M. F., Vega-Nieva, D. J., Corral-Rivas, J. J., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., López-Sánchez, C. A. y Carrillo, A. (2018). Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México. *Rev. Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 157-185. Doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>
- Hernández-Ramos, A., Cano-Pineda, A., Flores-López, C., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & Martínez Á., L. (2019). Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521806. doi: 10.21829/myb.2019.2521806
- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urías, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factor de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938.
- Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & Martínez-Trinidad, T. (2019). Multi-criteria and multi-objective evaluation to optimize the selection of areas to establish forest plantations. *Madera y Bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2521819>
- Instituto de la Candelilla. 2018. Aplicaciones. http://www.candelilla.org/?page_id=536&language=es. Consultado en septiembre de 2022.
- Jiménez, L. D., Valverde, J. C., Arias, D., Jiménez, L. D., Valverde, J. C., & Arias, D. (2018). Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb. procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15, 53–60. <https://doi.org/10.18845/RFMK.V15I1.3775>
- Návar-Cháidez, J. J. (2010). Biomass allometry for tree species of northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 507-519.
- Norma Oficial Mexicana NOM-018-RECNAT-1999, que establece los procedimientos, criterios y especificaciones técnicas y administrativas para realizar el aprovechamiento sostenible de la hierba de candelilla, transporte y almacenamiento del cerote. 1999. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2264.pdf>; consultado en Julio de 2020
- Solano, D., Vega, C., Eras, V. H. y Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluvial del Ecuador. *Rev. CEDAMAZ*, 4(1), 32-44.
- Villavicencio-Gutiérrez, E. E., Hernández-Ramos, A., Aguilar-González, C., & García-Cuevas, X. (2018). Estimación de la biomasa foliar seca de *Lippia graveolens* Kunth del sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 187-207. doi: 10.29298/rmcf.v9i45.139