

Modelo alométrico para estimar la producción acumulada de oxígeno en *Neltuma glandulosa* a partir del área superficial de copa

Allometric model for estimating cumulative oxygen production in *Neltuma glandulosa* from crown surface area

Luis Miguel Toribio-Ferrer^{1*} , Óscar Alberto Aguirre-Calderón¹ , Javier Jiménez-Pérez¹ ,
Eduardo Alanís-Rodríguez¹ 

¹Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera Nacional km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: toryferrer@live.com

Artículo científico

Recibido: 25 de septiembre 2024

Aceptado: 13 de agosto 2026

RESUMEN. El objetivo del presente estudio fue ajustar tres modelos alométricos para cuantificar la producción acumulada de oxígeno en función del área superficial de copa en individuos de *Neltuma glandulosa* (ex *Prosopis glandulosa*). Se realizó un muestreo dirigido y no destructivo en 60 individuos de mezquite en poblaciones naturales de San Pedro, Coahuila, México. Mediante técnicas volumétricas estándar se estimaron el volumen de madera, la biomasa y el contenido de carbono. La producción de oxígeno se estimó mediante una relación estequiométrica basada en el contenido de carbono y los pesos atómicos del CO₂. Los modelos alométricos no lineales se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios en el programa estadístico R®. El modelo de potencia presentó el mejor ajuste al alcanzar una R² ajustada de 0.83 y un error estándar de 31.88 kg, además de cumplir con todos los supuestos de no autocorrelación, homocedasticidad y distribución normal en sus residuales. La máxima producción acumulada de oxígeno observada fue en un árbol de 6 m de altura y 7.12 m de diámetro de copa, con 276.12 kg, equivalente a lo requerido por un ser humano durante 11 meses de vida. El modelo obtenido puede ser empleado por actores del sector forestal y ambiental para estimar la producción acumulada de oxígeno en áreas similares a las del presente estudio.

Palabras clave: Crecimiento, mezquite, modelos alométricos, potencia, pruebas de validación.

ABSTRACT. The objective of this study was to fit three allometric models to quantify cumulative oxygen production as a function of crown surface area in individuals of *Neltuma glandulosa* (ex *Prosopis glandulosa*). A targeted and non-destructive sampling was conducted on 60 mesquite individuals from natural populations in San Pedro, Coahuila, Mexico. Wood volume was calculated using standard volumetric techniques, and biomass and carbon content were subsequently determined. Oxygen production was estimated through a stoichiometric relationship based on carbon content and the atomic weights of CO₂. The nonlinear allometric models were fitted using the ordinary least squares method in the R® statistical program. The Power model showed the best fit, with an adjusted R² of 0.83 and a standard error of 31.88 kg, in addition to meeting the assumptions of no autocorrelation, homoscedasticity, and normal distribution of residuals. The highest cumulative oxygen production observed corresponded to a tree measuring 6 m in height and 7.12 m in crown diameter, with 276.12 kg, equivalent to the amount required by a human being over 11 months of life. The model obtained can be used by stakeholders in the forestry and environmental sectors to estimate cumulative oxygen production in areas similar to those of the present study.

Keywords: Growth, mezquite, allometric models, power, validation tests.

Como citar: Toribio-Ferrer LM, Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J, Alanís-Rodríguez E (2026) Modelo alométrico para estimar la producción acumulada de oxígeno en *Neltuma glandulosa* a partir del área superficial de copa. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e4334. DOI: 10.19136/era.a13n3.4334.

INTRODUCCIÓN

En los ambientes áridos y semiáridos de México, las especies del género *Neltuma* constituyen un componente relevante de los sistemas ecológicos y productivos, debido tanto a las funciones que desempeñan en estos ecosistemas como a los recursos que proporcionan a las comunidades locales (García-Sánchez *et al.* 2012). Entre sus principales formas de aprovechamiento se encuentra la producción de carbón vegetal, actividad que ha ejercido presión sobre algunas poblaciones naturales de mezquite (Ríos-Sauceda *et al.* 2011). A pesar de que las regiones semidesérticas concentran una proporción importante del carbono almacenado en el país, estimada en alrededor del 31%, aún son limitados los estudios enfocados específicamente en cuantificar este reservorio en poblaciones de mezquite (Masera-Cerutti *et al.* 1997, Méndez-González *et al.* 2006, 2012).

La estimación de variables como el volumen y la biomasa arbórea permite caracterizar la capacidad de los recursos forestales para almacenar carbono y aporta información útil para su evaluación en el contexto de la mitigación del cambio climático (Návar-Cháidez *et al.* 2004). Para obtener estas estimaciones sin recurrir a procedimientos destructivos, se han desarrollado modelos matemáticos que relacionan las variables de interés con atributos dendrométricos de medición relativamente sencilla, entre ellos la altura total, el diámetro basal y el diámetro de copa (Acosta-Mireles *et al.* 2002, Méndez-González *et al.* 2006). En especies de mezquite, este tipo de relaciones ha sido utilizado para predecir el volumen de los individuos, estimar su biomasa aérea y determinar indirectamente el carbono almacenado (Méndez-González *et al.* 2006, 2012, Ríos-Sauceda *et al.* 2011; Silva-García *et al.* 2018). Sin embargo, la mayor parte de estos trabajos se ha concentrado en variables estructurales y de almacenamiento de carbono, mientras que la estimación de la producción acumulada de oxígeno en *Neltuma glandulosa* (Torr.) Britton & Rose continúa escasamente abordada.

La cuantificación del oxígeno a partir del carbono almacenado debe entenderse como una estimación indirecta y complementaria, y no como una medición del flujo instantáneo de O₂ liberado durante la fotosíntesis. Mediante relaciones estequiométricas es posible convertir la cantidad de carbono fijado en la biomasa en una estimación teórica del oxígeno asociado a dicho almacenamiento (Nowak *et al.* 2007). Este procedimiento ha sido aplicado previamente en especies forestales, entre ellas *Pinus teocote* Schltdl. & Cham y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl, para aproximar la producción acumulada de oxígeno mediante modelos alométricos (Ríos-Camey *et al.* 2019). Asimismo, estudios recientes han considerado de manera conjunta la captura de carbono y la liberación de oxígeno como funciones ecológicas de interés (Zhang *et al.* 2024). No obstante, para *Neltuma glandulosa* aún no se dispone de un modelo específico que permita estimar este indicador a partir de variables morfométricas de obtención sencilla en campo.

Neltuma glandulosa ha sido tradicionalmente aprovechada por las comunidades locales como fuente de productos y recursos de primera necesidad. Sin embargo, esta especie, esencial en los ecosistemas semidesérticos, enfrenta una creciente presión debido a su sobreexplotación (Ríos-Reyes *et al.* 2017, Toribio-Ferrer *et al.* 2025). Dada su capacidad para adaptarse a condiciones extremas y su papel como principal especie maderable en estas zonas, resulta crucial comprender y cuantificar sus servicios ecosistémicos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo alométrico para la cuantificación de la producción acumulada de oxígeno

en *Neltuma glandulosa*, utilizando como variable predictiva el área superficial de la copa del árbol. La generación de esta herramienta busca contribuir a la valoración ecológica de la especie y aportar información aplicable al manejo sostenible de los mezquitales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en poblaciones naturales de mezquite localizadas en los ejidos Malanoche y Arracadas, NCPA Nuevo San Pedro, Puerto de Ventanillas y La Jococa, pertenecientes al municipio de San Pedro, Coahuila, México (Figura 1). En la zona se presentan condiciones climáticas áridas, representadas por los tipos BWhw y BSohw, ambos climas semicálidos (INEGI 2008). La precipitación del área varía de 300 a 400 mm (INEGI 2006) con una temperatura media anual de 20 a 22 °C (INEGI 2007).

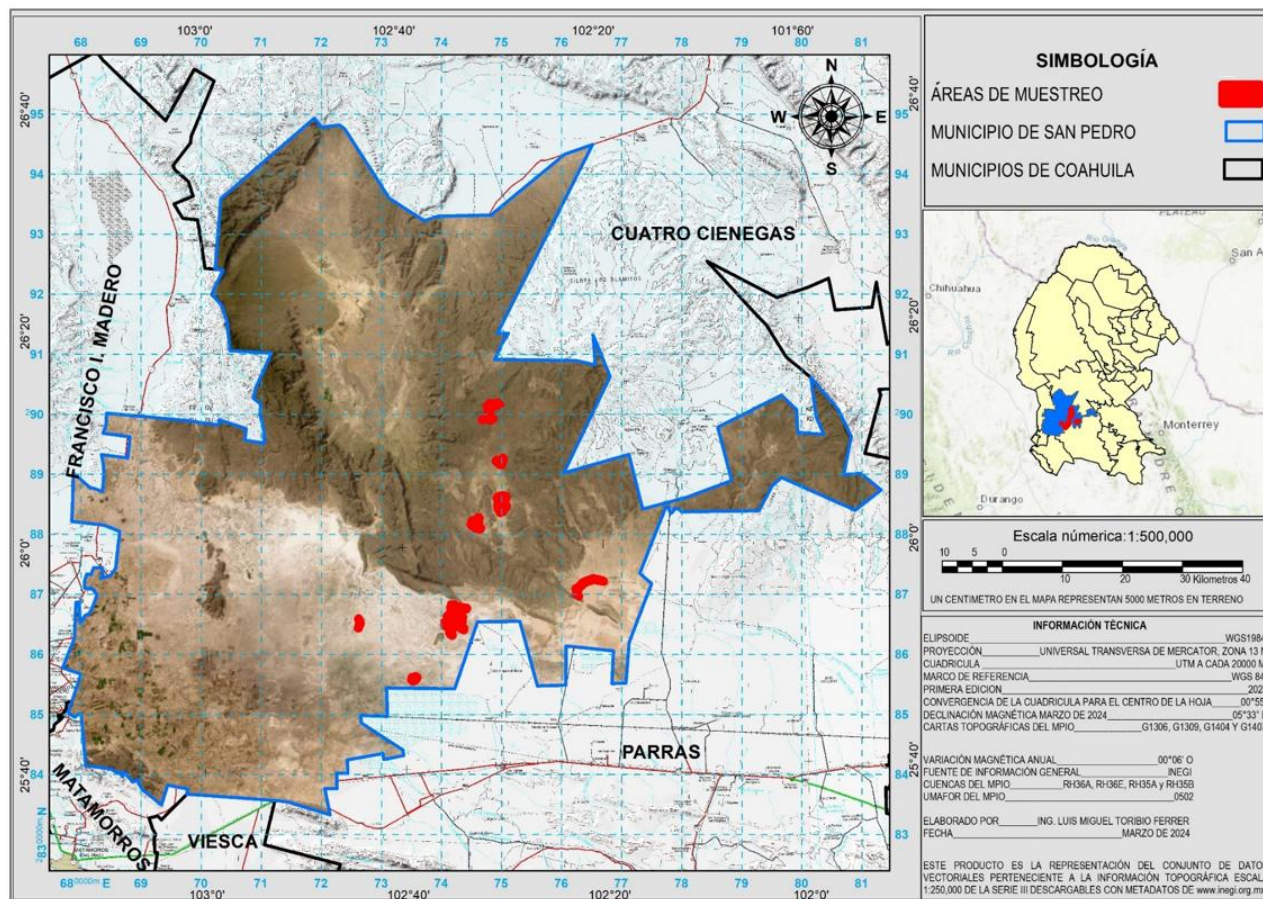


Figura 1. Ubicación de las áreas de muestreo de mezquitales del estudio en el municipio de San Pedro, Coahuila.

La cobertura vegetal del área de estudio está constituida principalmente por matorral desértico rosetófilo y, en menor proporción, por matorral desértico micrófilo (INEGI 2018). Dentro de estas comunidades, *Neltuma glandulosa* se encuentra asociada con especies características de ambientes

áridos, entre ellas *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff., *Cylindropuntia leptocaulis* (DC.) F.M.Knuth, *Agave aspérrima* Jacobi, *Mammillaria chionocephala* J.A. Purpus, *Mammillaria pottsii* Scheer ex Salm-Dyck, *Neolloydia conoidea* (DC.) Britton & Rose, *Larrea tridentata* (DC.) Coville, *Opuntia rastrera* F.A.C. Weber, *Agave lechuguilla* Torr., *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. y *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. La presencia y dominancia del mezquite contribuyen de manera importante a la configuración estructural de estas comunidades, condición favorecida por su capacidad de establecerse bajo temperaturas elevadas y regímenes de precipitación reducidos (Alanís-Rodríguez *et al.* 2015, Medina-Guillén *et al.* 2017).

Diseño de muestreo

En una fase preliminar, se identificaron las principales poblaciones de mezquites en el municipio de San Pedro, Coahuila, mediante programas de manejo vigentes específicos para la especie. Durante esta etapa, se recopilaron datos sobre las dimensiones que los ejemplares de mezquite alcanzan en la región (Ríos-Sauceda *et al.* 2011). Posteriormente, se realizó un muestreo dirigido no destructivo en 60 individuos de *Neltuma glandulosa*. El número de árboles se definió con base en los criterios metodológicos propuestos para el ajuste de ecuaciones alométricas, en los cuales se considera una muestra de 60 individuos como adecuada para este tipo de modelos (Návar-Cháidez 2010). Asimismo, este tamaño de muestra es consistente con estudios alométricos desarrollados en especies de *Neltuma*, donde se han empleado muestras de alrededor de 40 individuos para el ajuste de modelos de biomasa aérea (Méndez-González *et al.* 2012).

La selección de los individuos se realizó procurando cubrir el intervalo observado de H y Dc en campo, desde árboles de menor talla hasta individuos de mayor desarrollo estructural. No se incluyeron árboles muertos, severamente dañados o con copa incompleta, debido a que estas condiciones podían modificar la relación entre la estructura de copa y la producción acumulada de oxígeno.

Levantamiento de datos en campo

En cada uno de los 60 individuos seleccionados se registraron las principales variables necesarias para caracterizar la estructura del árbol y posteriormente estimar su volumen. Se midieron el diámetro basal (Db, cm), la altura total (H, m) y el diámetro de copa (Dc, m). Para el fuste principal se determinó el diámetro inicial (Di, cm) y final (Df, cm), además de su longitud (Lf, m). En las ramas con diámetro superior a 5 cm se obtuvo el diámetro inicial (Dri, cm) y final (Drf, cm), así como la longitud correspondiente (Lr, m); en las ramas de menor diámetro se registraron el diámetro medio y la longitud. La altura, el diámetro de copa y la longitud de las ramas se determinaron con un flexómetro Truper® modelo 12696, mientras que las mediciones diamétricas se realizaron con una forcípula Mantax Blue de 500 mm y una cinta diamétrica modelo 283D/5 m. El componente foliar no fue considerado debido a la escasa presencia de hojas observada durante el periodo de muestreo.

Obtención del volumen

Debido al carácter no destructivo del muestreo, el volumen de los árboles se determinó sin realizar el apeo de los individuos. Para ello, el fuste y las ramas con diámetro mayor a 5 cm se dividieron en secciones, cuyo volumen se estimó mediante la fórmula de Smalian a partir de los diámetros

registrados en ambos extremos y de la longitud de cada segmento. Este procedimiento permitió realizar la cubicación de los componentes leñosos manteniendo en pie los ejemplares evaluados y evitando su aprovechamiento, el cual se encuentra sujeto a las disposiciones aplicables al manejo de recursos forestales maderables. La expresión utilizada para el cálculo del volumen fue la propuesta por Cruz-de-León y Uranga-Valencia (2013):

$$V = \left(\frac{(0.7854 * D_1^2) + (0.7854 * D_2^2)}{2} \right) L$$

Donde: V = volumen de la sección (m³), D₁ = diámetro mayor (m), D₂ = diámetro menor (m) y L = longitud de la sección (m).

Para las ramas menores de cinco cm de diámetro se aplicó la fórmula de Huber (Cruz-de-León y Uranga-Valencia 2013).

$$V = (0.7854 * D_3^2) L$$

Donde: V = volumen de la sección (m³), D₃ = diámetro de la mitad de la rama (m) y L = longitud de la sección (m). El volumen total por individuo se obtuvo mediante la suma total de los volúmenes de cada sección.

Cuantificación de la biomasa

La biomasa leñosa de cada individuo se estimó a partir del volumen calculado para el fuste y las ramas, considerando la densidad específica de la madera. Para *Neltuma glandulosa* se adoptó un valor de 0.70 g cm⁻³, reportado por Ordóñez-Díaz *et al.* (2015). Este valor es cercano al promedio de 0.73 g cm⁻³ documentado por Sotomayor y Villaseñor (2006) para especies del género *Neltuma*, lo que respalda su empleo en la estimación de la biomasa de los individuos evaluados.

Obtención del carbono almacenado

El carbono almacenado en cada individuo se estimó de manera indirecta a partir de la biomasa previamente calculada. Para esta conversión se utilizó una fracción de carbono de 48.86%, valor determinado por Manzano-Caramillo *et al.* (2009) para poblaciones naturales de *Neltuma glandulosa* del noreste de México. Este porcentaje se encuentra dentro del intervalo reportado para la especie y el género en estudios previos realizados en la región (Jiménez-Pérez *et al.* 2008, Ríos-Sauceda *et al.* 2011).

Estimación de la producción de oxígeno

La producción acumulada de oxígeno se estimó a partir del carbono retenido en la biomasa de cada individuo. Esta aproximación representa una cantidad teórica de O₂ asociada al carbono fijado durante el crecimiento del árbol, por lo que no debe interpretarse como una medición directa de la liberación instantánea de oxígeno durante la fotosíntesis. Para su cálculo se empleó una relación estequiométrica basada en los pesos atómicos del carbono y del oxígeno, siguiendo el criterio señalado por Nowak *et al.* (2007) y retomado por Ríos-Camey *et al.* (2019). La expresión utilizada fue la siguiente:

$$O_2 = C * F$$

Donde: O_2 = producción teórica acumulada de oxígeno (kg), C = carbono almacenado en la biomasa (kg), F = factor de conversión a oxígeno tomando como base los pesos atómicos de las moléculas de carbono y oxígeno (32/12).

Modelo para estimar área superficial de copa

El área superficial de copa (Asc) se utilizó como una variable representativa de la superficie externa de la copa asociada con la interceptación de radiación y el desarrollo del follaje, donde ocurre gran parte de la actividad fotosintética del árbol (Van Laar y Akça 2007, Vargas-Larreta *et al.* 2010). Para su estimación, la geometría de la copa se aproximó a la forma de un paraboloides, empleando la longitud y el radio de copa como dimensiones de referencia, de acuerdo con el procedimiento descrito por Rodríguez-Laguna *et al.* (2008). El cálculo se realizó mediante la siguiente expresión:

$$Asc = \frac{\pi * Rc}{6 * Lc} \left[(4 * Lc^2 + Rc^2)^{\frac{3}{2}} - Rc^3 \right]$$

Donde: Asc = área superficial de la copa (m^2), Lc = longitud de copa (m) medida desde la base de esta hasta la punta más alta del árbol y Rc = radio de copa (m).

Análisis estadísticos

Para estimar la producción acumulada de oxígeno en *Neltuma glandulosa* se ajustaron tres modelos alométricos no lineales (Tabla 1) previamente utilizados en estudios de biomasa y variables estructurales de especies forestales (Montes de Oca-Cano *et al.* 2009, Méndez-González *et al.* 2012, Silva-García *et al.* 2018, Villavicencio-Gutiérrez *et al.* 2020). Los parámetros de cada ecuación se estimaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios en el programa estadístico R® (R Core Team 2024). El Asc se consideró una variable predictora de especial interés debido a su relación funcional con la superficie foliar y, por tanto, con el proceso fotosintético.

Tabla 1. Modelos alométricos ajustados para cuantificar la producción acumulada de oxígeno en *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila, México.

Modelos no lineales		
No	Ecuaciones	Modelos
1	Schumacher-Hall	$O_2 = B_0 * Asc^{B_1} * H^{B_2}$
2	Potencia	$O_2 = B_0 (Asc)^{B_1}$
3	Alométrico	$O_2 = B_0 (Asc H)^{B_1}$

O_2 : Producción acumulada de oxígeno en kg. Asc: Área superficial de copa en m^2 . H: Altura total en m. B_0 , B_1 y B_2 : Parámetros de la regresión.

La comparación entre modelos se realizó considerando simultáneamente su capacidad de ajuste y el comportamiento de los residuos. Como criterios de desempeño se utilizaron el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustada}$), el error estándar de la estimación (S_{xy}), el coeficiente de variación (CV %) y la significancia estadística de los parámetros, con un nivel de referencia de $p \leq$

0.05. La validación de los supuestos de regresión incluyó la prueba de Durbin-Watson para evaluar autocorrelación, la prueba de Kolmogórov-Smirnov para examinar la normalidad de los residuos y la prueba de White para detectar heterocedasticidad (Massey 1951, Durbin y Watson 1971, White 1980). Todos los análisis se realizaron en R® (R Core Team 2024).

RESULTADOS

Estadísticas descriptivas

En este estudio se consideraron todas las categorías de altura y diámetro de copa de las poblaciones naturales de mezquite en las áreas analizadas (Tabla 2). Los individuos de mezquite presentaron una H que varió entre 1.92 y 6.00 m, con un Dc máximo de 7.12 m y un radio de copa promedio de 2.53 m. La Lc máxima fue de 5.09 m (esta especie se ramifica a pocos centímetros del suelo), el área superficial máxima de copa fue de 6 242.74 m² y la producción acumulada de oxígeno registrada osciló entre 5.05 y 276.12 kg con un promedio de 103.67 kg ind⁻¹.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila, México.

Estadísticos	H (m)	Dc (m)	Rc (m)	Lc (m)	Asc (m ²)	O ₂ (kg)
No. de observaciones	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Máximo	6.00	7.12	3.56	5.09	6 242.74	276.12
Media	3.61	5.06	2.53	2.78	1 188.31	103.67
Mínimo	1.92	2.93	1.46	0.88	7.57	5.05
Desviación estándar	1.14	1.17	0.58	1.12	1 438.49	73.76
Coeficiente de variación	0.31	0.23	0.23	0.40	1.21	0.71
Coeficiente de asimetría	0.12	-0.29	-0.29	0.16	1.70	-0.84
Curtosis	-0.73	-1.21	-1.21	-0.76	2.70	0.51

H: Altura total. Dc: Diámetro de copa. Rc: Radio de copa. Lc: Longitud de copa. Asc: Área superficial de copa. O₂: Producción acumulada de oxígeno (kg).

Las variables de H, Dc, Rc y Lc presentaron coeficientes de asimetría cercanos a cero, lo que indica distribuciones relativamente equilibradas. En cambio, el Asc mostró asimetría positiva (1.70) y mayor curtosis (2.70), asociada con la presencia de pocos individuos con copas de gran superficie.

Modelo alométrico para cuantificar la producción acumulada de oxígeno

Los tres modelos alométricos evaluados mostraron una alta significancia estadística ($p < 0.05$) en las poblaciones analizadas, evidenciando una notable capacidad explicativa, con coeficientes de determinación ajustados superiores a 0.80 (Tabla 3). Estos resultados confirman que las variables de altura y área superficial de copa son predictores robustos para estimar la producción acumulada de oxígeno en la especie de *Neltuma glandulosa*.

Tabla 3. Estadísticas de regresión para la cuantificación de la producción acumulada de oxígeno de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila, México.

Modelo	B ₀	B ₁	B ₂	R ² _{ajustada}	S _{xy}	CV	K-S	D-W	WHITE	OM
1	5.47674	0.30745	0.68723	0.82	30.07	30.75	0.0714	1.9141	10.214	3
Pr > t	<0.0001	<0.0001	0.0053				0.8973	0.3690	0.0013	
2	5.5939	0.44123		0.83	31.88	28.75	0.0627	1.7157	5.8563	1
Pr > t	<0.0001	<0.0001					0.9605	0.1331	0.7155	
3	5.40533	0.37218		0.82	30.27	29.19	0.0843	1.8052	8.6621	2
Pr > t	<0.0001	<0.0001					0.7552	0.2237	0.0032	

R²_{ajustada}: Coeficiente de determinación ajustado. S_{xy}: Error estándar de la estimación. CV: Coeficiente de variación (%). D-W: Estadístico de Durbin-Watson para evaluar la autocorrelación. K-S: Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov. White: Test de heterocedasticidad de White. Pr > |t|: Significancia estadística al 95%. OM: Orden de selección de modelos con mejores ajustes.

Los modelos de Schumacher-Hall (1) y Alométrico (3) alcanzaron una R²_{ajustada} de 82%, con un error estándar que varía entre 30.07 y 30.27 kg, y coeficientes de variación relativamente bajos (29.19 a 30.75%). Sin embargo, al realizar la prueba de validación de las ecuaciones, el modelo de Schumacher-Hall mostró evidencia de heterocedasticidad en sus residuos ($\chi^2 = 10.214$, $p = 0.0013$), lo que indica que la varianza de los errores no es constante a lo largo de los valores predichos. Además, el modelo de Alométrico subestimó la producción del oxígeno (kg) en las primeras categorías, prediciendo valores inferiores a los observados.

Por otro lado, el modelo de Potencia (2) presentó el mejor desempeño estadístico global en la estimación de la producción acumulada de oxígeno para esta especie, alcanzando un R²_{ajustada} de 83%, un error estándar de 31.88 kg y el coeficiente de variación más bajo (28.75%). Este modelo no presentó sesgos a lo largo de las diferentes categorías de área superficial de copa registradas en el área de estudio.

Pruebas del diagnóstico de los residuos del modelo potencia

La evaluación de los residuos permitió verificar la adecuación estadística del modelo de Potencia (2). El estadístico de Durbin-Watson presentó un valor de 1.7157, con una significancia superior a 0.05, por lo que no se identificó dependencia serial entre los errores del modelo. Asimismo, la prueba de Kolmogórov-Smirnov indicó concordancia con una distribución normal ($D = 0.0627$, $p = 0.9605$). Por su parte, la prueba de White no mostró evidencia de heterocedasticidad ($\chi^2 = 5.8563$, $p = 0.7155$), lo que indica estabilidad en la varianza de los residuos a través del intervalo de valores estimados. En conjunto, estos diagnósticos respaldan el cumplimiento de los supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianzas para el modelo seleccionado (Tabla 3; Figura 2).

Estructura del modelo y producción acumulada de oxígeno

El modelo alométrico de Potencia (2) para la cuantificación de la producción acumulada de oxígeno en la especie de *Neltuma glandulosa* quedó estructurado de la siguiente manera:

$$O_2 = 5.5939 * Asc^{0.44123}$$

Donde: O_2 = Producción acumulada de oxígeno (kg), Asc = Área superficial de copa (m^2).

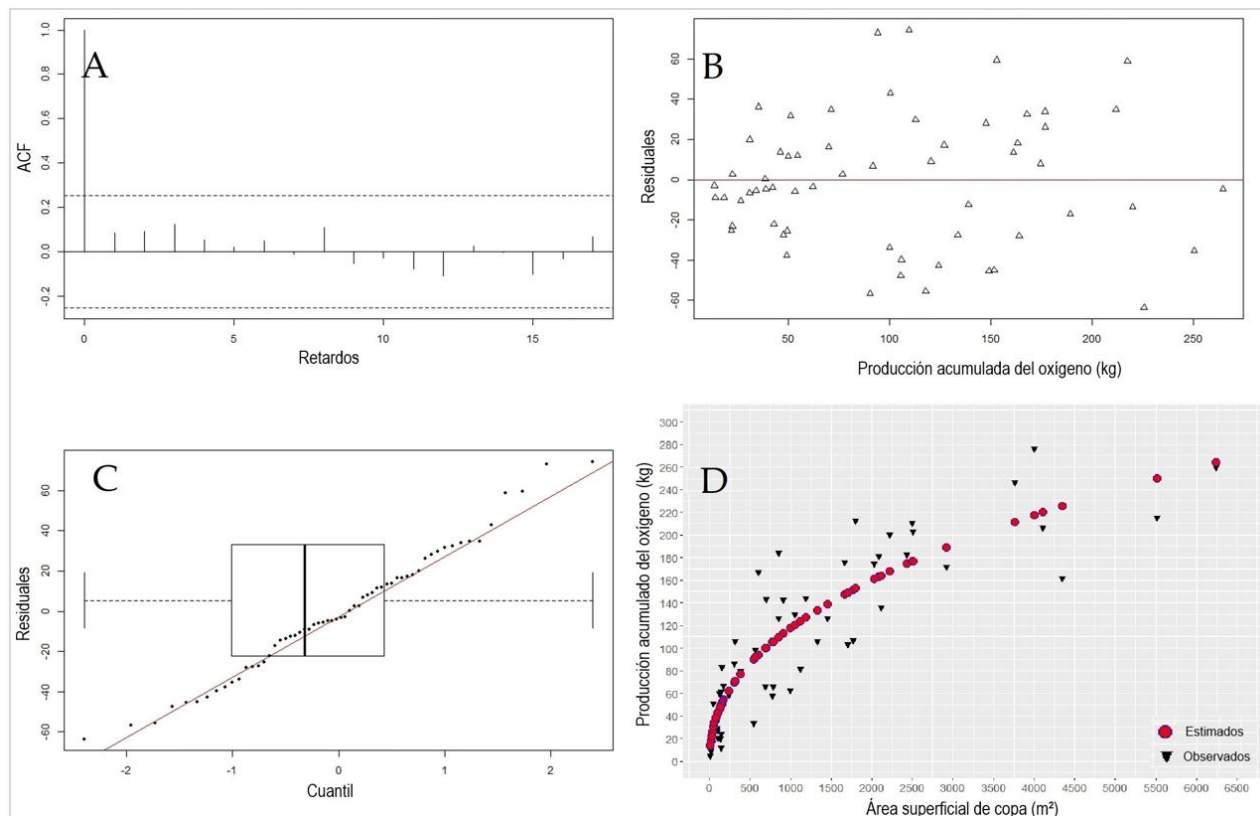


Figura 2. A) Distribución no sistemática de los retardos (no autocorrelación), B) Homocedasticidad en los residuales, C) Normalidad Q-Plot de los residuales y D) Producción acumulada de oxígeno observados y estimados mediante el modelo de Potencia para *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila, México.

La máxima Asc registrada fue de 6 242.74 m^2 , asociada a una producción teórica acumulada de 276.12 kg de O_2 . La Figura 3 ilustra cómo la producción de oxígeno aumenta de manera acelerada en las primeras etapas de desarrollo, pero esa tasa se reduce conforme los árboles maduran y alcanzan la etapa de fustal envejecido. Estos resultados sugieren que la producción de oxígeno en los ecosistemas de mezquite es un proceso dinámico, fuertemente influenciado por la etapa de desarrollo de los individuos.

Se proyecta que, una vez que el mezquite alcance su madurez y entre en la fase de fustal adulto y posteriormente en la de fustal envejecido, la producción acumulada de oxígeno alcanzará un punto de equilibrio, y no se observarán incrementos significativos adicionales. Este comportamiento es característico de las especies arbóreas, cuyo ciclo de vida muestra una compensación directa entre el desarrollo de la copa y la eficiencia en la producción de oxígeno, con un pico en la juventud y una disminución progresiva hacia la senescencia.

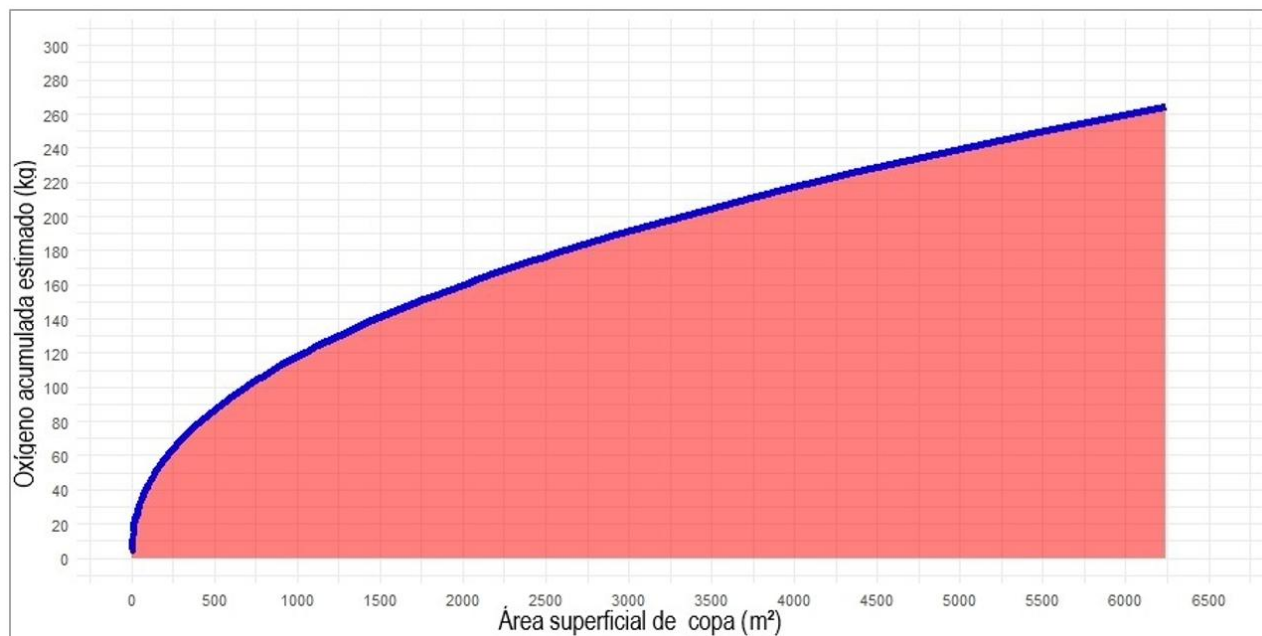


Figura 3. Producción acumulada de oxígeno con relación al área superficial de copa para *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila, México.

DISCUSIÓN

Estadísticas descriptivas

Las dimensiones registradas en los individuos evaluados se encuentran dentro de los intervalos documentados previamente para especies del género *Neltuma*. Méndez-González *et al.* (2006) reportaron para *Neltuma glandulosa* var. *torreyana* ejemplares de hasta 9 m de H y Dc superiores a 11.5 m, mientras que Návar-Cháidez *et al.* (2004) registraron valores medios de 2.99 m de H y 6 m de Dc para *N. glandulosa*. Por otra parte, Silva-García *et al.* (2018) documentaron en *Neltuma articulata* (S.Watson) Britton & Rose H de 3.53 a 10.58 m y Dc entre 1 y 8.5 m. Las diferencias observadas entre estos antecedentes y los valores obtenidos en el presente estudio pueden estar relacionadas con las condiciones ambientales particulares de cada sitio. Asimismo, la arquitectura de *N. glandulosa* se caracteriza por una expansión predominantemente horizontal de la copa, en contraste con el desarrollo más vertical descrito para *N. articulata*.

Modelo alométrico para cuantificar la producción acumulada de oxígeno

Para los estudios de ajuste de modelos alométricos, Návar-Cháidez (2010) sugiere que el tamaño de muestra ideal es de 60 árboles. Por su parte, Méndez-González *et al.* (2012) señalan que, en *Neltuma*, una muestra superior a 40 individuos permite obtener mejores estadísticos ($R^2_{ajustada}$ y CV). En el presente estudio se analizó una muestra de 60 árboles, por lo que el tamaño de muestra empleado se considera adecuado para el ajuste de los modelos. Pero, en estudios similares se han analizado muestras más pequeñas con 18 árboles (Méndez-González *et al.* 2006), 38 árboles (Návar-Cháidez *et al.* 2004) y 6 árboles (León-De la Luz *et al.* 2005).

El modelo de potencia ha demostrado ser una herramienta versátil y eficaz para estimar la biomasa y contenido de carbono en especies maderables (Gómez-Díaz *et al.* 2011, Méndez-González *et al.* 2012, Díaz-Ríos *et al.* 2017). En el presente estudio, se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado de 83%, lo cual se atribuye a la amplia variabilidad de área superficial de copa (7.57 a 6 242.74 m²), utilizada como variable predictiva para estimar la producción acumulada del oxígeno. En investigaciones previas, este modelo ha logrado una R²_{ajustada} entre 0.91 y 0.97 al emplear como variables predictivas la H y Db para la estimación de biomasa aérea (Méndez-González *et al.* 2012). No obstante, dado que el proceso de fotosíntesis, y por tanto la producción de oxígeno, ocurre en la superficie foliar, en este estudio se modeló en función de la producción de oxígeno con el área superficial de copa, justificando su uso como la variable más adecuada para este propósito.

Estudios previos han demostrado que la H y el Dc pueden explicar conjuntamente la biomasa aérea individual, y que la incorporación de variables de copa, incluida el Asc, puede mejorar el ajuste de modelos de biomasa cuando se busca representar la arquitectura tridimensional del árbol (Jucker *et al.* 2017, Zheng *et al.* 2019). Además, la estructura de la copa se relaciona con la asignación y acumulación de biomasa, lo que refuerza su utilidad como variable funcional en estudios alométricos (He *et al.* 2023).

Producción acumulada del oxígeno

De acuerdo con un estudio de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés; Perry y LeVan 2003), un ser humano requiere diariamente 0.84 kg de oxígeno. En el caso del mezquite, un árbol de 6 m de H y un Dc de 7.12 m (Asc = 6 242.74 m²) registró una producción acumulada de oxígeno de 276.12 kg, lo que equivale a la cantidad necesaria para sustentar a una persona durante aproximadamente 11 meses. Por su parte, según Ríos-Camey *et al.* (2019), un *Pinus teocote* de 23 m de H y 58.3 cm de diámetro normal puede acumular hasta 610 kg de oxígeno, suficiente para cubrir las necesidades de una persona durante aproximadamente 2 años. Asimismo, en *Pinus oocarpa* se registró una producción acumulada de 880.63 kg de oxígeno en un árbol de 25 m de H y 38.6 cm de diámetro normal, capaz de suplir las necesidades de una persona durante 2 años y 11 meses.

La producción acumulada de oxígeno en el mezquite fue menor en comparación con la de los pinos. Estas diferencias no disminuyen la relevancia ecológica del mezquite, ya que *Neltuma glandulosa* es una especie dominante y funcionalmente importante en ecosistemas semidesérticos, donde pocas especies alcanzan porte arbóreo y contribuyen de manera significativa a la captura de carbono, provisión de hábitat, protección del suelo y mantenimiento de recursos forestales para las comunidades locales.

El modelo constituye una herramienta no destructiva para estimar la producción acumulada de oxígeno en mezquites similares a los evaluados. Puede apoyar el manejo forestal, la restauración y la valoración de servicios ecosistémicos. Su uso debe limitarse al intervalo morfométrico analizado para evitar errores de extrapolación. Futuras investigaciones podrían fortalecer el modelo mediante validaciones independientes, incorporación de variables adicionales de copa y evaluación en otras poblaciones de *Neltuma glandulosa* distribuidas en regiones áridas y semiáridas.

CONCLUSIONES

De los tres modelos alométricos evaluados, el modelo de Potencia (2) resultó ser el más preciso y confiable para estimar la producción acumulada de oxígeno en esta especie, con una R^2 ajustada del 83% empleando como variable predictora el área superficial de copa, además de cumplir con todos los supuestos de validación del modelo de regresión: no autocorrelación, homocedasticidad y distribución normal en sus residuales. En las primeras categorías de Asc, se observó una producción acelerada de oxígeno, que disminuye a medida que el mezquite alcanza su etapa adulta. La máxima producción acumulada de oxígeno observada fue de 276.12 kg, equivalente al requerimiento humano durante aproximadamente 11 meses. Estos resultados destacan la importancia ecológica de *Neltuma glandulosa* como especie leñosa funcional en ecosistemas semiáridos. El modelo generado puede emplearse como una herramienta no destructiva para apoyar el manejo forestal, la restauración y la valoración de servicios ecosistémicos en mezquitales.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al despacho técnico forestal TF Estudios y Proyectos SA de CV por el apoyo brindado durante los muestreos en campo para la toma de las variables dendrométricas.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles M, Vargas-Hernández J, Velázquez-Martínez A, Etchevers-Barra JD (2002) Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Alanís-Rodríguez E, Mora-Olivo A, Jiménez-Pérez J, González-Tagle MA, Yerena-Yamallel JI, Martínez-Ávalos JG, González-Rodríguez LE (2015) Composición y diversidad del matorral desértico rosetófilo en dos tipos de suelo en el noreste de México. *Acta Botánica Mexicana* 1(110): 105-117. <https://doi.org/10.21829/abm110.2015.187>
- Cruz-de-León G, Uranga-Valencia LP (2013) Theoretical evaluation of Huber and Smalian methods applied to tree stem classical geometries. *Bosque* 34(3): 311-317. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000300007>
- Díaz-Ríos MJ, Vázquez-Alarcón A, Uribe-Gómez M, Sánchez-Vélez A, Lara-Bueno A, Cruz-León A (2017) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16(spe): 3235-3249. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.393>
- Durbin J, Watson GS (1971) Testing for serial correlation in least squares regression. III. *Biometrika* 58(1): 1-19. <https://doi.org/10.2307/2334313>

- García-Sánchez R, Camargo-Ricalde SL, García-Moya E, Luna-Cavazos M, Romero-Manzanares A, Manuel Montaña N (2012) *Prosopis laevigata* and *Mimosa biuncifera* (Leguminosae), jointly influence plant diversity and soil fertility of a Mexican semiarid ecosystem. *Revista de Biología Tropical* 60(1): 87-103. <https://doi.org/10.15517/rbt.v60i1.2365>
- Gómez-Díaz JD, Etchevers-Barra J D, Monterrosos-Rivas A I, Campo-Alvez J, Tinoco-Rueda JA (2011) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 261-272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- He L, Zhang X, Wang X, Ullah H, Liu Y, Duan J (2023) Tree crown affects biomass allocation and its response to site conditions and the density of *platycladus orientalis* linnaeus plantation. *Forests* 14(12): 2433. <https://doi.org/10.3390/f14122433>.
- INEGI (2006) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Precipitación media anual. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>. Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2024.
- INEGI (2007) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Temperatura media anual. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267551>. Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2024.
- INEGI (2008) Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1 000 000. Unidades Climáticas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2024.
- INEGI (2018) Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>. Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2024.
- Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón OA, Yerena-Yamallel JI (2008) Catálogo de contenido de carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. 44p. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fichas_de_contenido_de_carbono1.pdf. Fecha de consulta: 01 de septiembre de 2024.
- Jucker T, Caspersen J, Chave J, Antin C, Barbier N, Bongers F, Dalponte M, van-Ewijk KY, Forrester DI, Haeni M, Higgins SI, Holdaway RJ, Iida Y, Lorimer C, Marshall PL, Momo S, Moncrieff GR, Ploton P, Poorter L, Rahman KA, Coomes DA (2017) Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology* 23(1): 177-190. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>
- León-De la Luz JL, Domínguez-Cadena R, Díaz-Castro SC (2005) Evaluación del peso del leño a partir de variables dimensionales en dos especies de mezquite *Prosopis articulata* S. Watson y *P. palmeri* S. Watson, en Baja California Sur, México. *Acta Botánica Mexicana* 72: 17-32. <https://doi.org/10.21829/abm72.2005.998>
- Manzano-Caramillo MG, Cantú-Vega J, Silva-Cavazos FJ, Martínez-Medina J (2009) Método práctico para estimación de biomasa y carbono acumulado en poblaciones naturales de mezquite (*Prosopis glandulosa*) en el noreste de México. Centro de Calidad Ambiental. Campus Experimental INIFAP, Terán, N.L. 11p.
- Masera-Cerutti OR, Ordóñez-Díaz MJH, Dirzo-Minjarez R (1997) Carbon emissions from mexican forests: current situation and longterm scenarios. *Climatic Change* 35(3): 265-295. <https://doi.org/10.1023/A:1005309908420>

- Massey FJ (1951) The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association* 46(253): 68-78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>
- Medina-Guillén R, Cantú-Silva I, Estrada-Castillón E, González-Rodríguez H, Delgadillo-Villalobos JA (2017) Estructura y diversidad del matorral desértico rosetófilo rehabilitado con rodillo aireador, Coahuila, México. *Polibotánica* 44(22): 95-107. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.7>
- Méndez-González J, Santos-Méndez A, Nájera-Luna JA, González-Ontiveros V (2006) Modelos para estimar volumen y biomasa de árboles individuales de *Prosopis glandulosa*, var. *torreyana* en el Ejido Jesús González Ortega No 1, Mpio. de Mexicali, B.C. *Agrofaz* 6(2): 226-235.
- Méndez-González J, Turlan-Medina OA, Ríos-Saucedo JC, Nájera-Luna JA (2012) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 57-72. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.489>
- Montes-de-Oca-Cano E, García-Ramírez P, Nájera-Luna JA, Méndez-González J (2009) Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 65-71.
- Návar-Cháidez JJ, Méndez E, Nájera-Luna JA, Graciano-Luna JJ, Dale V, Parresol B (2004) Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*. 59(4): 657-667. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.010>
- Návar-Cháidez JJ (2010) Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México. *Agroecosistemas Tropicales y Subtropicales* 12(3): 507-519.
- Nowak DJ, Hoehn R, Crane DE (2007) Oxygen production by urban trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry* 33(3): 220-226. <https://doi.org/10.48044/jauf.2007.026>
- Ordóñez-Díaz JAB, Galicia-Naranjo A, Venegas-Mancera NJ, Hernández-Tejeda T, Ordóñez-Díaz MJ, Dávalos-Sotelo R (2015) Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21(spe): 77-216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Perry JL, LeVan MD (2003) Air purification in closed environments: overview of spacecraft systems. U.S. Conference: NBC Defense Collective Protection Conference, COLPRO 2002At: Orlando, Florida. 10p.
- R Core Team (2024) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 06 de agosto de 2024.
- Ríos-Camey JM, Aguirre-Calderón OA, López-López B, Calleja-Peláez B (2019) Producción de oxígeno en *Pinus teocote* Schl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede. En la región Montaña del estado de Guerrero, México. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 8(15): 52-71. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i15.83>
- Ríos-Reyes A, Alanís-Flores G, Favela-Lara S (2017) Etnobotánica de los recursos vegetales, sus formas de uso y manejo, en Bustamante, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(44): 1-23. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.106>
- Ríos-Sauceda JC, Valles-Gándara AG, Sosa-Pérez G, Sígala-Rodríguez JA, Albarrán-Albarado D (2011) Metodología para la estimación de volumen, biomasa y carbono para mezquite en la región norte-centro de México. In: Ríos-Sauceda JC, Trucíos-Caciano R, Valenzuela-Núñez LM, Sosa-Pérez G, Rosales-Serna R (eds) Importancia de las poblaciones de mezquite en el Centro-Norte de México. Libro Técnico No. 08. INIFAP. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Gómez Palacio, Dgo. pp. 107-134.
- Rodríguez-Laguna R, Valencia-Manzo S, Meza-Rangel J, Capó-Arteaga MA, Reynoso-Pérez A (2008) Crecimiento y características de la copa de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Revista Fitotecnica Mexicana* 31(1): 19-26. <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.1.19>
- Silva-García JE, Aguirre Calderón OA, Alanís-Rodríguez E, González-Tagle MA (2018) Ecuaciones de volumen para *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de

- México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 9(50): 415-438.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.261>
- Sotomayor-Castellanos JR, Villaseñor-Aguilar JM (2006) Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis sp.* Madera y Bosques 12(2): 3-15. <https://doi.org/10.21829/myb.2006.1221239>
- Toribio-Ferrer LM, Aguirre-Calderón OA, Alanís-Rodríguez E, Morán-Martínez AL, Toribio-Ferrer E, Rascón-Solano J (2025) Redistribución del valor bruto de producción como estrategia para estabilizar los ingresos comunitarios en zonas áridas: estudio de caso en el NCPE Nuevo San Pedro, Coahuila. Revista Electrónica de Ciencias Biológicas y Agropecuarias 12(26): 61-68. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi26.404>
- Van Laar A, Akça A (2007) Forest mensuration. Managing forest ecosystems, Vol. 13. Springer. Dordrecht, Holanda. 383p.
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas J, Aguirre-Calderón OA, Nagel J (2010) Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador BWINPro7. Madera y Bosques 16(4): 81-104. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1641162>
- Villavicencio-Gutiérrez EE, Mendoza-Morales S, Méndez-González J (2020) Modelo para predecir biomasa foliar seca de *Litsea parvifolia* (Hemsl.) Mez. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 11(58): 112-133. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.642>
- White H (1980) A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. Econometría 48(4): 817-838. <https://doi.org/10.2307/1912934>
- Zhang K, Yang Y, Zhai Z, Fang Y, He M, Cheng J, Tian Y, Cao X, Liu L (2024) Evaluation of carbon sequestration and oxygen-release potential of six mulberry tree varieties during summer. Forests 15(10): 1819. <https://doi.org/10.3390/f15101819>
- Zheng Y, Jia W, Wang Q, Huang X (2019) Deriving individual-tree biomass from effective crown data generated by terrestrial laser scanning. Remote Sensing 11(23): 2793. <https://doi.org/10.3390/rs11232793>