

## Artigos

### Morfometría de copa para *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née en Hidalgo, México

Crown morphometry for *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. and *Quercus rugosa* Née in Hidalgo, Mexico

Jonathan Hernández-Ramos<sup>I,II</sup> , Gregório Ángeles-Pérez<sup>II</sup> ,  
Ramiro Pérez-Miranda<sup>III</sup> , Valentin José Reyes-Hernández<sup>II</sup> ,  
Ramón Razo-Zárte<sup>IV</sup> 

<sup>I</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Xul-Ha, Quintana Roo, México

<sup>II</sup>Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México

<sup>III</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México

<sup>IV</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tulancingo, Hidalgo, México

## RESUMEN

*Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa* son especies de importancia ecológica y económica por su distribución geográfica, intervalo altitudinal, abundancia en regiones montañosas y plasticidad. Sin embargo, la gestión y aprovechamiento forestal han sido incompatibles con las necesidades ecológicas de cada especie de *Quercus*, en parte por la falta de herramientas silvícolas cuantitativas. Por tal motivo, se plantearon los objetivos de *i*) determinar los índices morfométricos (*IM*) y su correlación con el diámetro normal (*dn*), altura total (*At*), diámetro de copa (*dc*) y altura de fuste limpio (*Afl*); y *ii*) ajustar con Modelos de Efectos Mixtos (MEM), las características de la copa de *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa* en función del *dn*, con la inclusión de la covariable altitud. Con información dasométrica de 128 sitios de muestreo distribuidos en 32 conglomerados en bosques de clima templado del estado de Hidalgo, se calcularon y correlacionaron ocho *IM* mediante el coeficiente de *Pearson*. Además, se ajustaron con MEM los modelos de Schumacher, Alométrico y Lineal para estimar el *dc*, área de proyección de copa (*Apc*) y proporción de la copa en porcentaje (*pc%*), respectivamente. Para *Quercus crassifolia*, por cada metro que crece el radio de copa se tiene un incremento de 8,8 cm en *dn*, mientras que en *Quercus rugosa* el aumento es de 9,8 cm. El índice de esbeltez promedio es de 0,53 y 0,51, respectivamente. La correlación de *Pearson* entre variables dasométricas e *IM* con la forma de copa fue de -0,61 y para la altura total, *Apc*, *dc* y *pc%* con el *dn* resulto >0,64, ambos para las dos especies. Los MEM fueron estadísticamente robustos y sin violaciones de los supuestos de regresión. La información silvícola generada puede ser referencia para planear las actividades de gestión y monitoreo en los rodales *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*.

**Palabras-clave:** Relaciones alométricas; Aprovechamiento forestal; Bosque de encino; Gestión forestal

## ABSTRACT

---

*Quercus crassifolia* and *Quercus rugosa* are species of ecological and economic importance due to their geographical distribution, altitudinal range, abundance in mountainous regions, and plasticity. However, forest management and exploitation have proven incompatible with the ecological needs of each *Quercus* species, partly due to the lack of quantitative silvicultural tools. For this reason, the following objectives were established *i*) to determine the morphometric indices (*MI*) and their correlation with the normal diameter (*dn*), total height (*At*), crown diameter (*dc*) and clean stem height (*Afl*); and *ii*) to adjust with Mixed Effects Models (MEM), the characteristics of the *Quercus crassifolia* and *Quercus rugosa* crown as a function of *dn*, with the inclusion of the altitude covariate. With dasometric information from 128 sampling sites distributed in 32 clusters in temperate climate forests of the state of Hidalgo, eight *MI* were calculated and correlated using the Pearson coefficient. In addition, the Schumacher, Allometric and Linear models were adjusted with MEM to estimate the *dc*, crown projection area (*Apc*), and crown proportion in percentage (*pc%*), respectively. For *Quercus crassifolia*, for every meter that the crown radius grows there is an increase of 8.8 cm in *dn*, while in *Quercus rugosa* the increase is 9.8 cm. The average slenderness index is 0.53 and 0.51, respectively. The Pearson correlation between dasometric variables and *MI* with the cup shape was -0.61 and for the total height, *Apc*, *dc* and *pc%* with the *dn* it was >0.64, both for the two species. The MEMs were statistically robust and without violations of the regression assumptions. The silvicultural information generated can be a reference to plan management and monitoring activities in the *Quercus crassifolia* and *Quercus rugosa* stands.

**Keywords:** Allometric relationships; Forest use; Oak forest; Forest management

## 1 INTRODUCCIÓN

México es el país con la mayor diversidad de especies de encino reportadas en el continente americano (GOVARTS; FRODIN, 1998; ZAVALA, 1998; VALENCIA, 2010; RODRÍGUEZ-TREJO; POMPA-GARCÍA, 2016), de las cuales 109 son endémicas (VALENCIA-A, 2004; ARIZAGA *et al.*, 2009). Los encinos pertenecen a la familia Fagaceae y el género *Quercus*, se subdivide en seis subgéneros de los cuales *Leucobalanus*, *Erythrobalanus* y *Protobalanus* se encuentran en el país (ZAVALA, 1998; PÉREZ *et al.*, 2000; VALENCIA-A, 2004).

*Quercus* es un género con importancia ecológica gracias a su distribución geográfica, intervalo altitudinal (200-3.500 m s. n. m.) y abundancia en las regiones montañosas de México, por lo que es un grupo de especies con fundamental papel funcional por su alta plasticidad de adaptación en distintas condiciones de crecimiento (ZAVALA, 1998; PÉREZ *et al.*, 2000; RZEDOWSKI, 2006; ARIZAGA *et al.*,

2009; RODRÍGUEZ-TREJO; POMPA-GARCÍA, 2016). Sin embargo, la gestión forestal ha sido incompatible con las necesidades ecológicas de cada especie y, además, el aprovechamiento inadecuado de los bosques en donde cohabitan, ha llevado a la disminución de sus poblaciones y productividad de estos bosques (MÁRQUEZ *et al.*, 2005; HUERTA-PANIAGUA; RODRÍGUEZ-TREJO, 2011).

En regiones rurales de México, la madera de encino es la base de la economía local, ya que es la fuente de energía para consumo doméstico (carbón), estructuras de construcción y elaboración de muebles, artesanías y mangos de herramientas. Además, los taninos contenidos en su corteza se utilizan para curtidurías y como tintas vegetales; la corteza o los frutos también se emplean con fines medicinales, el follaje como alimento forrajero, condimento alimenticio, elaboración de harinas y extractos esenciales (PÉREZ *et al.*, 2000; ARIZAGA *et al.*, 2009; HUERTA-PANIAGUA; RODRÍGUEZ-TREJO, 2011).

El aprovechamiento forestal (leña, carbón o escuadría) de especies de *Quercus* en México, ocupa el segundo lugar a nivel nacional y representó un 11% del volumen autorizado (0,737 millones de metros cúbicos rollo, m<sup>3</sup>r) en 2016. Destacan por su producción los estados de Durango (299.662 m<sup>3</sup>), Chihuahua (81.248 m<sup>3</sup>), Sonora (53.346 m<sup>3</sup>) y Estado de México (39.194 m<sup>3</sup>) con el 64,18% de la producción nacional. En el estado de Hidalgo se reportaron 23,135 m<sup>3</sup>r producidos dentro de los bosques de pino-encino, encino-pino y encino bajo manejo forestal (SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE RECURSOS NATURALES-COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, 2015; SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE RECURSOS NATURALES, 2016).

Dos especies que por su distribución natural y existencias volumétricas destacan en la producción en el estado de Hidalgo son *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née. El primero, es un árbol con dimensiones de 8-20 m de altura total (*At*, m) y diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*, cm) de 25-50 cm, distribuido entre 1.900 a 2.800 m de altitud en cañadas de los bosques de pino-encino, encino-pino y encino, en sitios húmedos con suelos pedregosos.

Por su parte, *Quercus rugosa*, alcanza dimensiones de 13 a 25 m en *At* y *d* entre 10 y 80 cm; se desarrolla entre las altitudes de 1.100 y 3.000 m, generalmente en barrancas, laderas y terrenos planos dentro de bosques de pino-encino, oyamel y encino, de condiciones húmedas y suelos ligeramente rocosos (RZEDOWSKI, 2006; ARIZAGA *et al.*, 2009; SABÁS-ROSALES *et al.*, 2015). Sin embargo, a pesar de su importancia económica, no se cuenta con información cuantitativa que contribuya a la comprensión de su dinámica de crecimiento, que sirva para la mejora en la gestión de los bosques donde habitan estas especies.

Las características arquitectónicas de copa en un árbol, o del dosel en un rodal, son el reflejo de la dinámica de los procesos fisiológicos, potencial y velocidad de crecimiento, así como de la habilidad competitiva de un individuo por factores limitantes como luz, espacio físico y nutrientes (SANQUETTA *et al.*, 2014; CISNEROS *et al.*, 2019). Los índices morfométricos (*IM*), que describen la copa de los árboles, proporcionan información que puede ser considerada en la planeación de las actividades de gestión y aprovechamiento forestal (CUNHA; FINGER, 2013; FIGUEIREDO *et al.*, 2014; HESS *et al.*, 2016). Sin embargo, la información relacionada con estos aspectos es escasa para *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, por lo que se plantearon los objetivos de: *i*) determinar los *IM* y su correlación con variables dasométricas individuales y *ii*) ajustar las características de la copa de dichas especies de encino en función del *dn*, bajo el enfoque de Modelos de Efectos Mixtos (MEM) con la inclusión de la covariable altitud. Para el trabajo se plantearon las hipótesis de que a través de las correlaciones entre las variables dasométricas e *índices morfométricos*, además, de los MEM ajustados con la covariable de altitud, se puede explicar la variabilidad en la arquitectura y las dimensiones de copa en ambas especies, por lo tanto obtener indicadores numéricos que funcionen como pautas silvícolas cuantitativas dentro de la planeación del aprovechamiento maderable o en conservación de estas especies que crecen en los bosques templados del estado de Hidalgo y están sometidos a una gestión forestal.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio tiene un clima de tipo templado húmedo, pertenece a la región hidrológica Río Pánuco, tiene una clase de roca ígnea extrusiva y sedimentaria, principalmente, y la vegetación es de tipo bosque de pino-encino, encino-pino y encino (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES-COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, 2015). La información utilizada en el análisis (i.e.  $dn$ ,  $dc$ , altura de fuste limpio ( $Afl$ ), y  $At$ ) proviene de 128 sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup> distribuidos en 32 conglomerados en el estado de Hidalgo, los cuales fueron medidos a través del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de 2004-2009 (INF y S 2004-2009) (COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, 2012). Del total de sitios utilizados, en 80% se registró a *Quercus crassifolia* (698 pares de datos) y en 20% *Quercus rugosa* (115 pares de datos). Con la información mencionada, se calcularon las relaciones morfométricas, de acuerdo con lo propuesto por Costa *et al.* (2016), Hess *et al.* (2016) y Cisneros *et al.* (2019), de la siguiente forma:

$$rc = dc / 2 \text{ (Radio de copa)} \quad (1)$$

$$Apc = \pi \cdot rc^2 \text{ (Área de proyección de la copa)} \quad (2)$$

$$pc = At - Afl \text{ (Profundidad de copa)} \quad (3)$$

$$ie = At / dn \text{ (Índice de esbeltez)} \quad (4)$$

$$is = dc / dn \text{ (Índice saliente)} \quad (5)$$

$$ia = dc / At \text{ (Índice de amplitud)} \quad (6)$$

$$fc = dc / pc \text{ (Formal de copa)} \quad (7)$$

$$pc\% = (dc / At) \cdot 100 \text{ (Proporción de la copa en porcentaje)} \quad (8)$$

Donde:  $dc$  = diámetro de copa (m);  $rc$  = radio de copa (m);  $At$  = altura total (m);  $Afl$  = altura de fuste limpio (m);  $dn$  = diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (cm);  $pc$  = proporción de copa.

Para los datos dasométricos e *IM* se calcularon los valores medios, máximos, mínimos, desviación estándar, error típico y varianza; además, se realizó un análisis de correlación de *Pearson*, al considerar coeficientes mayores de 0.6, para después explorar la explicación biológica en el comportamiento particular de copa y dinámica del dosel (COSTA *et al.*, 2016; HESS *et al.*, 2016; PÉREZ *et al.*, 2017).

La arquitectura de copa en *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, se analizó al ajustar los modelos de Schumacher, Alométrico y Lineal, para estimar el  $dc$ ,  $Apcy$   $pc\%$  en función del  $dn$ , por medio de la función  $lm$  en el software *R*® (R Core Team, 2016) (Tabla 1). Los ajustes se realizaron mediante modelos de efectos mixtos (*MEM*) para generalizar los resultados (SANQUETTA *et al.*, 2014; HESS *et al.*, 2016; CISNEROS *et al.*, 2019). Estos ajustes asumen distribución normal con media igual a cero y una matriz de varianzas-covarianzas que engloba la variabilidad de la muestra por nivel de

agrupación, que permite modelar el error específico de la muestra por nivel; además, generaliza el valor de los parámetros a las distintas condiciones de crecimiento evaluadas (PINHEIRO; BATES, 1998; CORREA; SALAZAR, 2016). La inclusión de la *Alt* dentro de los MEM se realizó como una covariable categórica de agrupación, la cual se construyó al definir clases a cada 200 m para los registros de *Quercus crassifolia* (2.100 m - 3.269 m) y *Quercus rugosa* (2.700 m - 3.100 m) (Tabla 1).

Tabla 1 – Estructura de los modelos ajustados con efectos mixtos al incluir la covariable *altitud* para cada variable de interés en *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa* en Hidalgo, México

No.	Modelo	Estructura
9,1	Schumacher	$dc = a_{0j} \cdot e^{(-a_1 \cdot dn^{-1})} + \varepsilon_{ij}$
9,2		$dc = a_0 \cdot e^{(-a_1j \cdot dn^{-1})} + \varepsilon_{ij}$
10,1	Alométrico	$Apc \quad Apc = a_{0j} \cdot dn^{a_1} + \varepsilon_{ij}$
10,2		$Apc = a_0 \cdot dn^{a_1j} + \varepsilon_{ij}$
11,1	Lineal	$pc\% = a_{0j} + a_1 \cdot dn + \varepsilon_{ij}$
11,2		$pc\% = a_0 + a_1j \cdot dn + \varepsilon_{ij}$
11,3		$pc\% = a_{0j} + a_1j \cdot dn + \varepsilon_{ij}$

Fuente: Autores (2021)

Donde: *dc* = diámetro de copa (cm); *Apc* = área de proyección de copa (m<sup>2</sup>); *pc%* =proporción de la copa en porcentaje (%); *dn* = diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (cm); *a<sub>0</sub>* y *a<sub>1</sub>* = parámetros a estimar; *ε* = término de error; *i* = *i*-ésima observación de la variable; *j* inclusión de los efectos.

La selección de los parámetros de los modelos (Tabla 1), se realizó mediante una comparación numérica entre los valores del coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) y Criterio de Información de Akaike (AIC) en los modelos. Además, se verificó que la significancia de los parámetros fuera diferente de cero (*p* ≤ 0,05) (CORREA; SALAZAR, 2016; R CORE TEAM, 2016; CAYUELA, 2018) y que resultaran con los menores valores de la Raíz del Cuadrado Medio del Error (*RCME*) (SANQUETTA *et al.*, 2014), Criterio de Información Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y valor en el logaritmo de verosimilitud

(*logLik*). De igual manera, se consideró el valor y la significancia de *F* en cada parámetro (<0,05) (SANQUETTA *et al.*, 2014; CISNEROS *et al.*, 2019), ya que el objetivo del ajuste en esta variable es encontrar las posibles diferencias que genera la altitud, y explicar en conjunto con los resultados de la correlación, el *pc%* para ambas especies.

Los supuestos de regresión de normalidad de variables y homocedasticidad del modelo más adecuado para *dc*, *Apc* y *pc%*, se analizaron de forma gráfica al considerar una distribución de frecuencias en los residuales normal y una dispersión homocedástica de los residuos (SAS INSTITUTE INC., 2014; CORRAL 2019).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El intervalo de aplicabilidad de los resultados para ambas especies se encuentra entre las categorías diamétricas de 10 cm y 60 cm, *Afl* de entre 3-4 m, y altura total de 9-25 m para *Quercus crassifolia*, y 7-18 m en *Quercus rugosa*, con un *dc* máximo de 10,8 m y 7,8 m, respectivamente (Tabla 2). Mientras que, del total del área basal en los sitios de muestreo en donde se registraron las especies (0.9548 m<sup>2</sup> promedio), el 38.59% correspondió a *Quercus crassifolia* y 36.77% a *Quercus rugosa*.

Al estimar la relación de proporción promedio entre el *dn/rc* como un indicador de acumulación del diámetro por área de cobertura, tal y como lo mencionan Cisneros, Moglia y Álvarez (2019), para *Quercus crassifolia* se encontró que por cada metro que crece el *rc*, el *dn* incrementa 8,82 cm, mientras que en *Quercus rugosa* el aumento es de 9,78 cm.

El *ie* promedio indica que por cada cm que aumenta el *dn*, se tiene un incremento de 53 cm en la altura de *Quercus crassifolia*, y de 51 cm en *Quercus rugosa*; además, los valores máximos y mínimos hacen referencia a un aumento en esta relación alométrica a medida que los árboles se hacen más longevos o incrementan sus dimensiones (Tabla 2). Los valores en el *ie* en ambas especies indican una buena resistencia mecánica a daños por fenómenos meteorológicos, por ejemplo, huracanes, tormentas y nevadas, o tratamientos silvícolas intensivos como cortas totales o árboles padres, ya que son medios y no están cercanos a la unidad (CISNEROS *et al.*, 2019).



Tabla 2 – Características dimensionales e índices morfométricos para árboles de dos especies de encino en Hidalgo, México

Estadísticos/Variables	<i>Quercus crassifolia</i>											
	<i>dn</i>	<i>At</i>	<i>dc</i>	<i>Afl</i>	<i>rc</i>	<i>Apc</i>	<i>pc</i>	<i>i</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc%</i>
Media	18,61	9,09	4,21	3,83	2,11	13,99	5,26	0,53	0,23	0,47	1,00	56,67
Mínimo	7,50	2,70	0,40	0,60	0,20	0,13	0,20	0,19	0,03	0,05	0,18	4,44
Máximo	58,80	25,00	10,80	14,00	5,40	91,61	21,50	1,28	0,50	1,07	11,50	95,71
Error típico	0,33	0,15	0,07	0,09	0,04	0,57	0,12	0,01	0,00	0,01	0,03	0,70
Desviación estándar	8,83	3,86	1,95	2,28	0,97	15,15	3,09	0,17	0,07	0,15	0,76	18,59
Varianza de la muestra	77,97	14,87	3,80	5,18	0,95	229,49	9,55	0,03	0,00	0,02	0,58	345,54

Estadísticos/Variables	<i>Quercus rugosa</i>											
	<i>dn</i>	<i>At</i>	<i>dc</i>	<i>Afl</i>	<i>rc</i>	<i>Apc</i>	<i>pc</i>	<i>ie</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc%</i>
Media	16,73	7,82	3,43	3,02	1,71	9,19	4,80	0,51	0,22	0,47	0,99	59,55
Mínimo	7,50	2,00	0,90	1,00	0,45	0,64	0,20	0,17	0,07	0,15	0,29	7,84
Máximo	58,40	17,20	7,80	8,80	3,90	47,78	13,20	1,15	0,40	0,98	8,50	87,42
Error típico	0,80	0,32	0,14	0,16	0,07	0,93	0,26	0,02	0,01	0,01	0,10	1,70
Desviación estándar	8,56	3,46	1,46	1,74	0,73	10,00	2,80	0,19	0,07	0,16	1,10	18,20
Varianza de la muestra	73,23	11,97	2,14	3,04	0,54	99,91	7,82	0,03	0,00	0,03	1,20	331,08

Fuente: Autores (2021)

Donde: *dn* = diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (cm); *At* = altura total (m); *dc* = diámetro de copa (m); *Afl* = altura de fuste limpio (m); *rc* = radio de copa (m); *Apc* = área de proyección de la copa (m<sup>2</sup>); *ec* = extensión de copa (m/m); *ie* = índice de esbeltez (m/cm); *is* = índice saliente (cm/cm); *ia* = índice de amplitud (cm/m); *fc* = formal de copa; *pc%* = proporción de copa expresada en porcentaje (%).

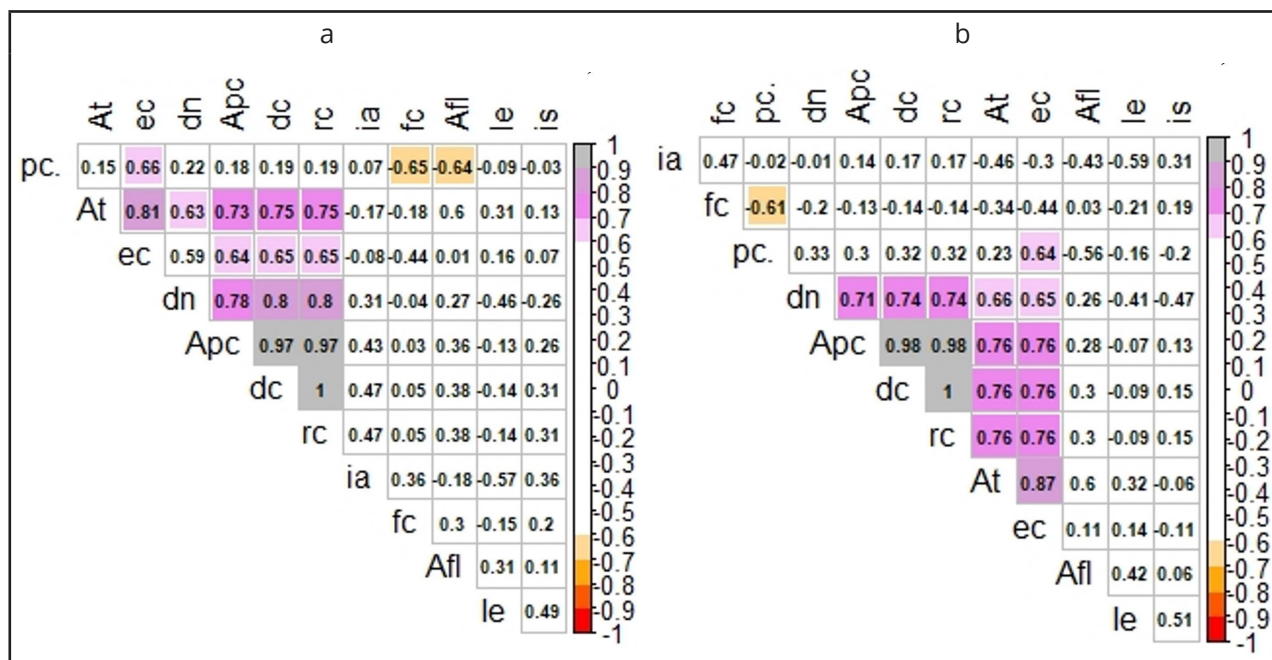
Los valores de incremento altura con respecto al diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (cm) son superiores a los reportados por Cisneros *et al.* (2019) para *Prosopis alba* (*ie*: 23,7-27,3) y concuerdan con el incremento de *ie* a medida que los individuos son más grandes. Sin embargo, estos resultados discrepan con la disminución del *ie* con respecto al incremento en las dimensiones y edad del arbolado

reportada por Hess *et al.* (2016) para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntz, situación que puede ser atribuible a las distintas condiciones de crecimiento y tolerancia de *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, en comparación con las especies descritas; sin embargo, no existen trabajos específicos de comparación para el género *Quercus*, por lo que no es posible tener referencias más específicas.

La correlación entre variables dasométricas e *IM* para *Quercus crassifolia* (Figura 1a) y *Quercus rugosa* (Figura 1b), muestra que las dimensiones de *pc%* son afectadas de manera negativa cuando incrementan las dimensiones del *fc* ( $<-0,61$ ). Este hallazgo concuerda con lo reportado por Durlo y Denardi (1998), quienes refieren que, a valores mayores en la forma de copa, éstas tienden a ser más aplanadas y a presentar menor productividad con respecto a copas esbeltas, lo cual se interpreta como un parámetro cuantitativo del ajuste morfológico para maximizar la cosecha de luz bajo condiciones de poca iluminación.

Las variables de *At*, *Apc*, *dc* y *pc%*, se correlacionaron positivamente con el *dn*, lo que indica un incremento en sus dimensiones a medida que aumenta el *dn* ( $>0,64$ ). El incremento de proporcionalidad entre las variables, puede ser utilizada como pauta para el manejo de la densidad, debido a que con un menor número de individuos por unidad de superficie se presentarían copas extensas (CISNEROS *et al.*, 2019), las cuales tendrían mayor número de ramas y por tanto menor calidad en la madera por la presencia de nudos. Además, cuando la densidad es baja no se aprovecha en forma eficiente la capacidad productiva de los sitios forestales, respuesta que no es la deseada desde una perspectiva silvícola (PÉREZ *et al.*, 2017; CISNEROS *et al.*, 2019) (Figura 1).

Figura 1 – Análisis de correlación *Pearson* entre datos dasométricos e índices morfométricos de copa para árboles de *Quercus crassifolia* (a) y *Quercus rugosa* (b) en Hidalgo, México



Fuente: Autores (2021)

Donde: *dn* = diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (cm); *At* = altura total (m); *dc* = diámetro de copa (m); *Afl* = altura de fuste limpio (m); *rc* = radio de copa (m); *Apc* = área de proyección de la copa (m<sup>2</sup>); *pc* : *ec* = profundidad de copa (m/m); *ie* = índice de esbeltez (m/cm); *is* = índice saliente (cm/cm); *ia* = índice de amplitud (cm/m); *fc* = formal de copa; *pc%* : *pc* = proporción de copa expresada en porcentaje (%).

El ajuste de *dc* y *Apc* en función del *dn* con MEM, muestra parámetros estadísticamente diferentes de cero ( $p > 0.05$ ), desviaciones en promedio de 2,07 m (RCME) y un efecto asintótico de la altitud (9,1:  $\alpha_0$ ) para ambas especies de *Quercus*. Mientras que, al modelar el *Apc* en función del *dn* la variación de la altitud tiene un efecto en la velocidad de cambio entre estas variables (10,2:  $\alpha_1$ ) (Tabla 3).

Tabla 3 – Estadísticos de bondad de ajuste con MEM y valor de los parámetros estimados para los modelos de diámetro de copa ( $dc$ ) y área de proyección de copa ( $Apc$ ), en función del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste ( $dn$ ) en dos especies de encinos en Hidalgo, México

No.	Especie	Parámetro	$a_0$	$a_1$	$R^2$	AIC
9,1	<i>Quercus crassifolia</i>		10,053	14,988	0,6996	2.090,53
		Error estándar	0,43478	0,47423		
9,2	<i>Quercus crassifolia</i>		10,373	15,368	0,6825	2.126,38
		Error estándar	0,25383	0,715847		
9,1	<i>Quercus rugosa</i>		7,280	11,439	0,6403	315,48
		Error estándar	0,58759	0,963168		
9,2	<i>Quercus rugosa</i>		7,600	12,164	0,6053	323,73
		Error estándar	0,45261	1,36793		
10,1	<i>Quercus crassifolia</i>		0,200	1,464	0,6930	4.961,01
		Error estándar	0,037	0,045186		
10,2	<i>Quercus crassifolia</i>		0,261	1,380	0,6956	4.953,93
		Error estándar	0,04157	0,053804		
10,1	<i>Quercus rugosa</i>		0,432	1,149	0,4906	784,75
		Error estándar	0,161	0,111694		
10,2	<i>Quercus rugosa</i>		0,127	1,497	0,7236	732,89
		Error estándar	0,04804	0,128317		

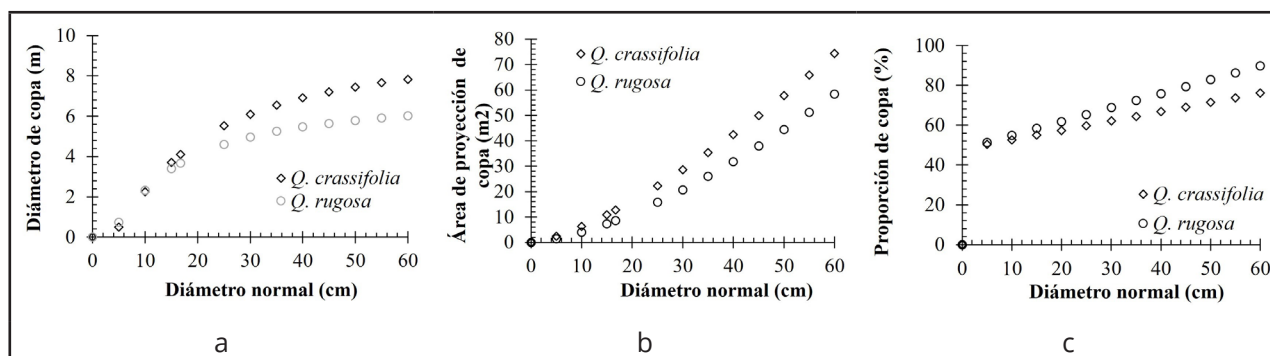
Fuente: Autores (2021)

Donde:  $R^2$  = coeficiente de determinación; AIC = criterio de información de Akaike.

Al aplicar los modelos seleccionados con los mejores parámetros de bondad de ambas especies, se observó una tendencia no lineal entre el  $dc-dn$  (9,1), la cual es semejante para ambas las dos especies hasta 15 cm de  $dn$ , siendo mayor el  $dc$  en *Quercus crassifolia* (Figura 2a). Esta tendencia de proporción concuerda con lo reportado por Cisneros *et al.* (2019) para *Prosopis alba* Griseb al emplear un modelo basado en el recíproco del diámetro. El modelo de  $Apc$  (10,2) muestra una estimación de forma creciente a medida que las dimensiones del  $dn$  aumentan para ambas especies, e indica que en el diámetro normal promedio en *Quercus crassifolia* (18,61 cm) y *Quercus*

*rugosa* (16,73 cm) el árbol ocupa 14,77 m<sup>2</sup> y 8,62 m<sup>2</sup> de superficie, respectivamente (Figura 2b). Con estos resultados, y de acuerdo con lo propuesto por Hess *et al.* (2016), sobre las necesidades de espacio de crecimiento libre de cada individuo y que esta variable puede explicar la amplitud dimensional dentro del sitio, se pueden hacer propuestas de manejo de densidad en rodales de las especies analizadas.

Figura 2 – Estimaciones realizadas con los mejores modelos para diámetro de copa (*dc*), área de proyección de copa (*Apc*) y proporción de copa en porcentaje (*pc%*), en función del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*) en dos especies de encinos en Hidalgo, México



Fuente: Autores (2021)

El ajuste de la expresión lineal con MEM (Tabla 1) resultó en parámetros significativos ( $p > 0,05$ ), con excepción de la estructura 11.3 para *Quercus crassifolia* (Tabla 4). Se pudieron identificar diferencias en el efecto de la *Alt* en la ordenada al origen (11,1:  $\alpha_0$ ) para *Quercus crassifolia*, y en ambos parámetros (11,3:  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$ ) para *Quercus rugosa*. Además, se obtuvieron valores en los parámetros que dan como resultado una tendencia media, y que generalizan las distintas condiciones de crecimiento evaluadas propiciadas por la altitud (Tabla 4). Los valores en los parámetros y la generalización de los resultados concuerdan con lo reportado por Cisneros *et al.* (2019) quienes señalan diferencias significativas al evaluar distintas posiciones de dominancia vertical de los árboles al utilizar la técnica de variables ficticias (*dummy*), con el ajuste de ocho modelos para *IM* en *Prosopis alba* en Argentina.

En tanto, Pérez *et al.* (2017) a través de un análisis de medias como muestras independientes reportan diferencias entre las variables dasométricas e *IM*, las cuales son reflejo de la productividad de los sitios forestales de *Acacia mangium* en Cuba de acuerdo con su condición de crecimiento. Por su parte Hess *et al.* (2016) al utilizar un modelo lineal mixto, proponen una tendencia promedio de incremento en tres condiciones de crecimiento diferentes para estimar la *pc%* de árboles de *Araucaria angustifolia* en el sur de Brasil.

Tabla 4 – Estadísticos de bondad de ajuste con MEM y valor de los parámetros estimados para el modelo proporción de copa expresada en porcentaje (*pc%*) en función del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*) en dos especies de encinos en Hidalgo, México

No.	Especie	Parámetro de efecto	Variable	Valor de F	Pr(F)	AIC	logLik
11,1		$a_0$	<i>dn</i>	<b>43,1210</b>	<b>&lt;0,0001</b>	5.919,6	-2.951,8
			<b>factor(Altitud)</b>	<b>26,0200</b>	<b>&lt;0,0001</b>		
11,2	<i>Quercus crassifolia</i>	$a_1$	<i>dn</i>	42,0210	<0,0001	5.937,6	-2.960,8
			<i>dn</i> : factor(Altitud)	21,8320	<0,0001		
11,3		$a_0$ y $a_1$	<i>dn</i>	43,2691	<0,0001	5.922,1	-2.948,1
			factor(Altitud)	26,1099	<0,0001		
11,1		$a_0$	<i>dn</i> : factor(Altitud)	1,4754	0,1956		
			<i>dn</i>	17,2500	<0,0001	961,7	-474,8
11,2	<i>Quercus rugosa</i>	$a_1$	factor(Altitud)	10,8510	<0,0001		
			<i>dn</i>	16,2385	<0,0001	968,6	-478,3
11,3		$a_0$ y $a_1$	<i>dn</i> : factor(Altitud)	8,0643	<0,0001		
			<b>dn</b>	<b>19,3084</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>951,5</b>	<b>-466,8</b>
11,3		$a_0$ y $a_1$	factor(Altitud)	12,1453	<0,0001		
			<i>dn</i> : <b>factor(Altitud)</b>	<b>5,3756</b>	<b>&lt;0,0001</b>		

Fuente: Autores (2021)

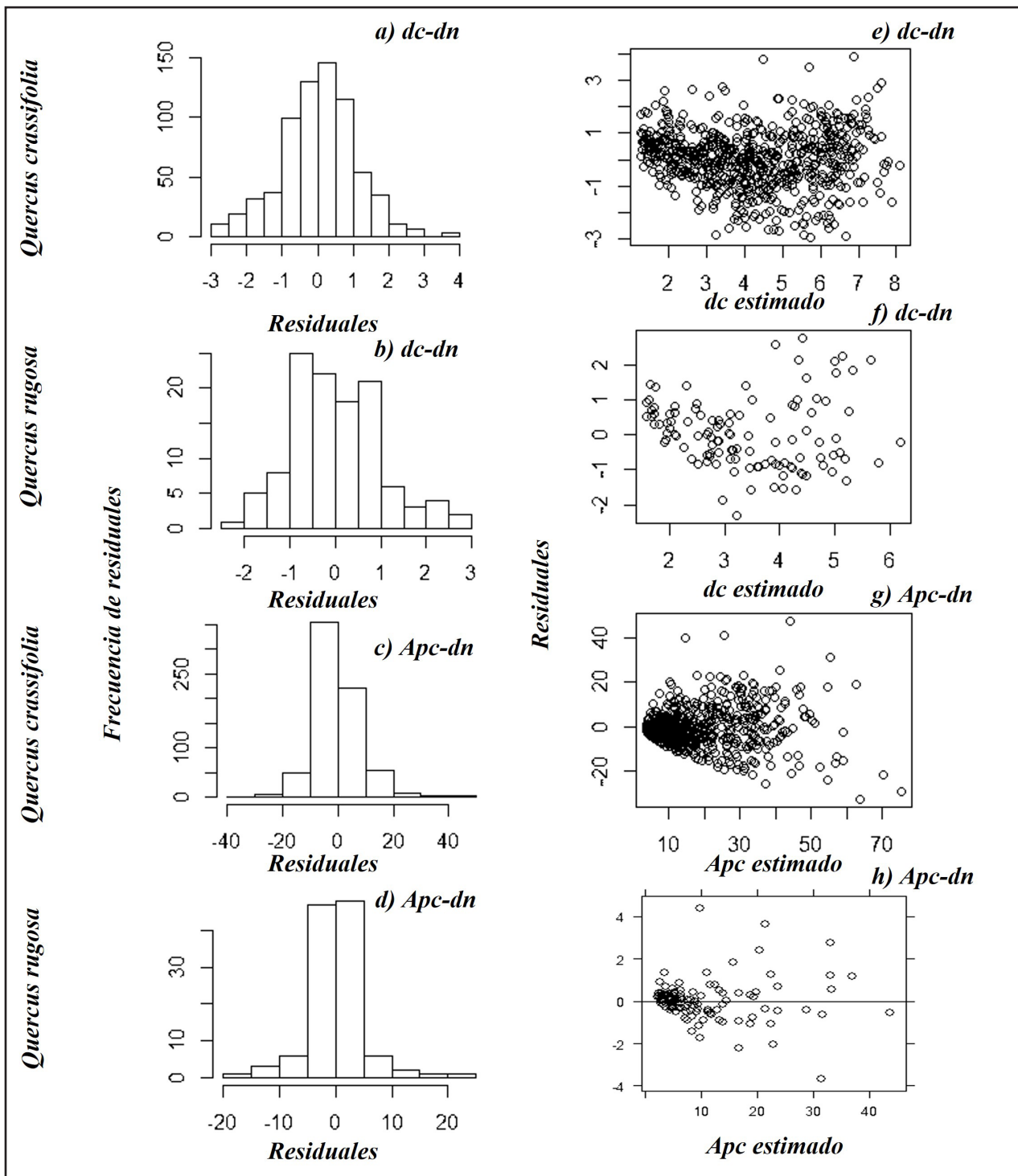
Donde: *AIC* = criterio de información de Akaike; *logLik* = logaritmo de verosimilitud.

Los resultados en la estimación de la  $pc\%$  para *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, señalan un incremento de la proporción a medida que aumentan las dimensiones del  $dn$ , siendo más amplio en *Quercus rugosa* que en *Quercus crassifolia* (Figura 2c). De acuerdo con Sanquetta *et al.* (2014) y Costa *et al.* (2016), esta situación es una respuesta a la densidad baja, la cual propicia una copa con mayores dimensiones debido a una menor mortalidad de las ramas inferiores. Este índice morfométrico es más sensible a la competencia por espacio de crecimiento y condiciones ambientales, en donde *Quercus crassifolia* es más afectado de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo.

Al verificar los supuestos de regresión de los modelos seleccionados como los mejores; 9,1 y 10,2, para estimar el  $dc$ ,  $Apc$  y  $pc\%$  en función del  $dn$  para ambas especies, se observó el cumplimiento de normalidad y homocedasticidad. De forma gráfica, se observa una distribución normal en la frecuencia en los residuales y una dispersión homocedástica (Figura 4). En tanto, para las expresiones 11,1 y 11,3 correspondientes a *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, respectivamente, se cumplen en ambos casos la normalidad por presentar una distribución lineal en los cuantiles teóricos con respecto a los residuales estandarizados, y una dispersión homocedástica de los residuales con respecto a los valores estimados por las expresiones (Figura 3) (SAS INSTITUTE INC., 2014; CORREA; SALAZAR, 2016; CAYUELA, 2018).

Las dimensiones y características dasométricas encontradas para *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*, son una respuesta directa de la disponibilidad de nutrimentos y dinámica de competencia por espacio de crecimiento, tal y como lo describe Hess *et al.* (2016) las cuales varían de acuerdo a la estructura de cada rodal. Además, son una medida cuantitativa del espacio vertical ocupado por cada individuo, la necesidad espacial para su crecimiento, el grado de estabilidad mecánica de cada especie, vitalidad y condición del dosel, y en general de la productividad de los bosques (DURLO; DENARDI, 1998; COSTA; GUIMARÃES; DIMAS, 2016).

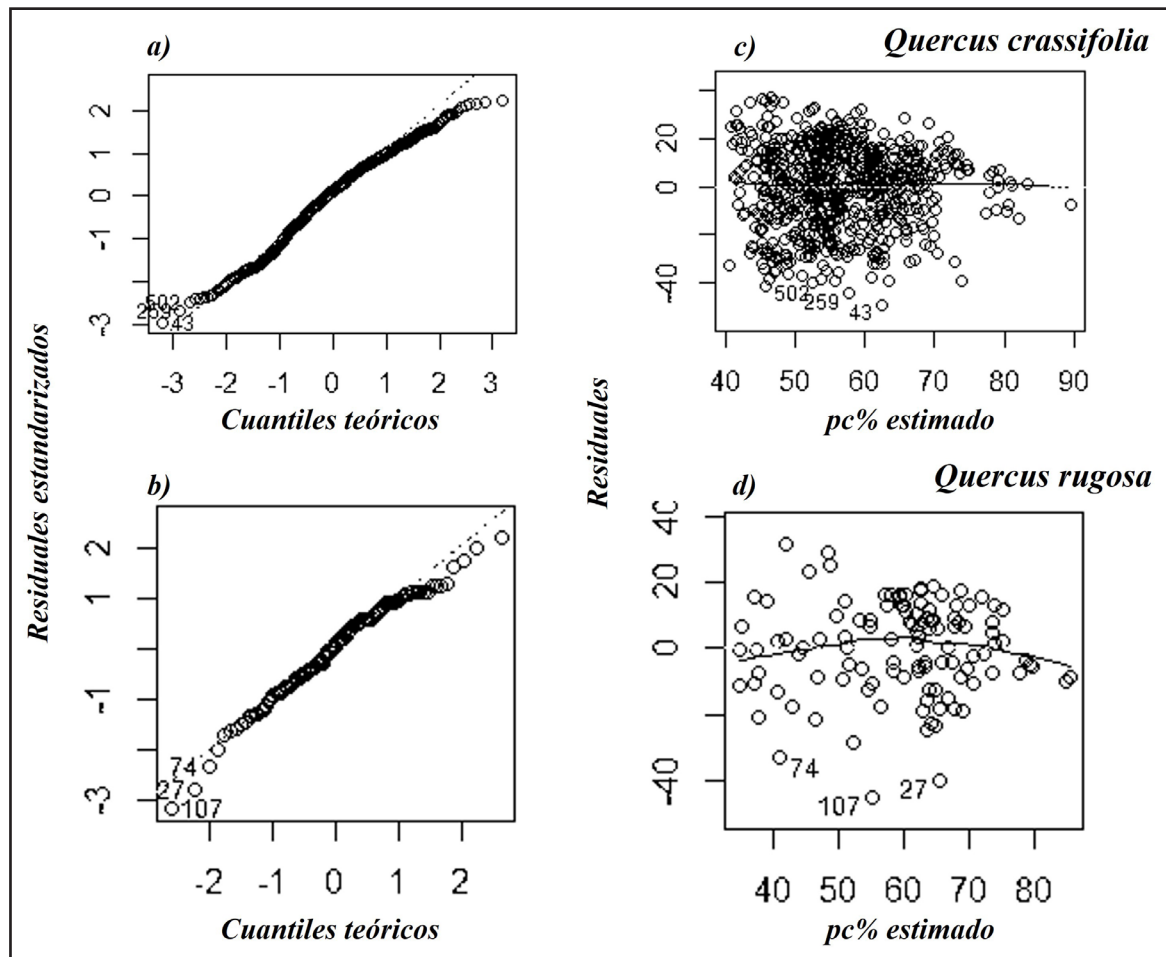
Figura 3 – Análisis gráfico de normalidad (*a, b, c y d*) y homocedasticidad (*e, f, g y h*) de los modelos seleccionados para estimar el diámetro de copa (*dc*) y área de proporción de copa (*Apc*) en función del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*) para dos especies de encinos en Hidalgo, México



Fuente: Autores (2021)



Figura 4 – Análisis gráfico de normalidad (*a* y *b*) y homocedasticidad (*c* y *d*) de los modelos seleccionados para estimar la proporción de copa expresada en porcentaje (*pc%*) en función del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*), para dos especies de encinos en Hidalgo, México



Fuente: Autores (2021)

A través de los *IM* que utilizan variables de fácil medición en campo, y que están correlacionadas con las dimensiones del *dn* como la *At*, *Alf* y *dc*; además, a partir del cálculo en gabinete de algunos indicadores, se puede llegar a establecer pautas de gestión y monitoreo forestal, que contribuyan a incrementar la productividad de los bosques (CUNHA; FINGER, 2013). De acuerdo con Leite, Zubizarreta-Gerendiain y Robinson (2012), la arquitectura de copa es el reflejo de la velocidad de los procesos eco-fisiológicos y la dinámica de competencia, tanto intra como interespecífica, ya que a su vez determinan la productividad del bosque.

El empleo de expresiones matemáticas para representar las relaciones de proporción entre las variables dasométricas o los *IM*, utilizando técnicas de ajuste como mínimos cuadrados ordinarios a través de regresión con el método *stepwise* (DURLO; DENARDI, 1998), variables *dummy* dentro de la regresión (COSTA; GUIMARÃES; DIMAS, 2016; CISNEROS *et al.*, 2019), modelos lineales mixtos con la inclusión de covariables de dominancia vertical (HESS *et al.*, 2016), o la comparación de los resultados mediante *t-Student* como muestras independientes (PÉREZ *et al.*, 2017), ha sido de gran utilidad para comprender la dinámica del área fotosintética de la planta con respecto a diferentes condiciones de crecimiento, y de apoyo en la toma de decisiones inteligentes y acorde a las necesidades de cada rodal o bosque dentro de la gestión y monitoreo forestal (FIGUEIREDO *et al.*, 2014; CISNEROS *et al.*, 2019). En este trabajo, los análisis realizados con MEM resultaron ser estadísticamente robustos y sin violaciones de los supuestos de regresión, y las estimaciones realizadas se ajustaron a la tendencia biológica de la información analizada.

## 4 CONCLUSIONES

Las variables diámetro de copa (*dc*), índices de proyección de copa (*Apc*) y la proyección de copa expresada en porcentaje (*pc%*), se correlacionaron de manera positiva con tendencias no lineal, creciente y lineal, respectivamente, con las dimensiones del diámetro normal medido a 1.3 m sobre el fuste (*dn*) para *Quercus crassifolia* y *Quercus rugosa*. La forma de copa (*fc*) se correlacionó negativamente con *pc%*, indicando una disminución del área de proyección a medida que incrementa la altura de fuste limpio (*Afl*) ambas especies.

Los valores del índice de esbeltez indican que ambas especies son estables mecánicamente a daños por efecto de fenómenos meteorológicos, como fuertes vientos, y a prácticas silvícolas intensivas. Además, los parámetros de proyección de copa, profundidad de copa y *Alf* en combinación con el *dn*, pueden tomarse como pauta para la planeación de actividades de gestión y monitoreo de estas dos especies en los bosques de pino-encino, encino-pino y encino.

Los modelos propuestos para estimar el *dc*, *Apc* y *pc%* en función del *dn* ajustados con modelos de efectos mixtos (MEM) demostraron que la altitud tiene efectos en las dimensiones de estas variables dependientes, y deja la ventana abierta para estudiar más a fondo, de manera particular, la respuesta del crecimiento a diferentes gradientes altitudinales en los cuales se desarrollan las especies analizadas.

## REFERENCIAS

- ARIZAGA, S.; MARTÍNEZ-CRUZ, J.; SALCEDO-CABRALES, M.; BELLO-GONZÁLES, M. A. **Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos**. México: SEMARNAT, INE. México, D.F., 2009. 147 p.
- CAYUELA, L. **Modelos lineales mixtos (LMM) y modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) en R**. Área de Biodiversidad y Conservación: Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España. 2018. 69 p.
- CISNEROS, A. B.; MOGLIA, J. G.; ÁLVAREZ, J. A. Morfometría de copa en *Prosopis alba* Griseb. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 863-884, 2019.
- COMISIÓN NACIONAL FORESTAL. **Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de resultados 2004-2009**. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México, 2012. 212 p.
- CORRAL, R., S.; SILVA, A. A. M.; QUIÑONEZ, B. G. Modelo generalizado no-lineal altura-diámetro con efectos mixtos para siete especies de *Pinus* en Durango, México. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, Coyoacán, v. 10, n. 53, p. 86-117, 2019. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.500>
- CORREA, M. J. C.; SALAZAR U. J. C. **Introducción a los modelos mixtos**. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Escuela de Estadística. Medellín, Colombia, 2016. 257 p.
- COSTA, E. A.; GUIMARÃES, F. C. A.; DIMAS, F. F. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 225-234, 2016. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509821116>
- CUNHA, T.A.; FINGER, C. A. G. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia Ocidental. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 43, n. 1, p. 9-18, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672013000100002>
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.
- FIGUEIREDO, E. O. *et al.* Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com LIDAR. **Cerne**, Lavras, v. 20 n. 4, p. 621-628, 2014. <https://doi.org/10.1590/01047760201420041693>
- GOVARTS, R.; FRODIN, D. G. **World Checklist and Bibliography of Fagales (Betulaceae, Corylaceae, Fagaceae and Ticodendraceae)**. Royal Botanical Gardens, Kew. Richmond, Surrey, Reino Unido, 1998. 546 p.
- HESS, A. F. *et al.* Morfometría de la copa de *Araucaria angustifolia* en sitios naturales en el sur de Brasil. **Bosque**, Valdivia, v. 37, n. 3, p. 603-611, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000300017>
- HUERTA-PANIAGUA, R.; RODRÍGUEZ-TREJO, D. A. Efecto del tamaño de semilla y la temperatura en la germinación de *Quercus rugosa* Née. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, Chapingo, v. 17, n. 2, p. 179-187, 2011. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.053>

- LEITE, L. P.; ZUBIZARRETA-GERENDIAIN, A.; ROBINSON, A. Modeling mensurational relationships of plantation – growth loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v. 289, p. 455-462, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.016>
- MÁRQUEZ, R. J.; MENDIZÁBAL-HERNÁNDEZ, L. C.; FLORES, R. C. I. **Foresta Veracruzana**, Xalapa, v. 7, n. 1, p. 31-36, 2005.
- PÉREZ, B. L. P.; REYES, Q. R.; RÍOS, A. C. Variables dasométricas relacionadas con la productividad de *Acacia mangium* Willd. **Revista Centro Agrícola**, Santa Clara, v. 44, n. 2, p. 14-21, 2017.
- PÉREZ, O. C. P.; DÁVALOS, S. R.; GUERRERO, C. E. Aprovechamiento de la madera de encino en México. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 6, n. 1, p. 3-13, 2000.
- PINHEIRO, J., C.; BATES, D. M. **Model building for nonlinear mixed effects model**. Department of Biostatistics and Department of Statistics, University of Wisconsin. Madison, WI, USA, 1998. 11 p.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016. Disponible en: <http://www.R-project.org/>. Acceso en: 23 may. 2020.
- RZEDOWSKI, J. **Vegetación de México**. 1<sup>ra</sup> Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 2006. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxCont.pdf>. Acceso en: 23 may. 2020.
- RODRÍGUEZ-TREJO, D. A.; POMPA-GARCÍA, M. Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 22, n. 2, p. 67-75, 2016. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221325>
- SABÁS-ROSALES, J. L.; SOSA-RAMÍREZ, J.; LUNA-RUIZ, J. J. Diversidad, distribución y caracterización básica del hábitat de los encinos (*Quercus*: Fagaceae) del estado de San Luis Potosí, México. **Botanical Sciences**, Coyoacán, v. 93, n. 4, p. 881-897, 2015. <https://doi.org/10.17129/botsci.205>
- SANQUETTA, C. R. *et al.* Equações para Estimativa do Diâmetro de copa para Acácia-negra. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 192-205, 2014. <https://doi.org/10.4322/floram.2014.001>.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE RECURSOS NATURALES. **Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016**. Ciudad de México, México. 2016. 225 p.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES-COMISIÓN NACIONAL FORESTAL. **Inventario Estatal Forestal y de Suelos-Hidalgo 2014**. SEMARNAT. Jalisco, México. 2015. 168 p.
- SAS INSTITUTE INC. **User's Guide**. SAS Institute Inc. North Carolina, E. U. 2014. 1373 p.
- VALENCIA A. S. Notes on the genus *Quercus* in Mexico. **International Oaks**, Petersburg, v. 21, p. 100-120, 2010.
- VALENCIA-A, S. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. **Boletín de la Sociedad Botánica de México**, Benito Juárez, v. 75, p. 33-53, 2004.
- ZAVALA, C. F. Observaciones sobre la distribución de encinos en México. **Polibotánica**, Miguel Hidalgo, v. 8, p. 47-64, 1998.

## Contribución de los Autores

### 1 – Jonathan Hernández-Ramos

Ciencias Forestales, Me., Investigador Titular

<https://orcid.org/0000-0003-2685-1199> • forestjonathanhdez@gmail.com

Contribuição: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción

### 2 – Gregorio Ángeles-Pérez

Agricultura, Dr., Profesor-Investigador Titular

<https://orcid.org/0000-0002-9550-2825> • gangeles@colpos.mx

Contribuição: Conceptualización, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción

### 3 – Ramiro Pérez-Miranda

Ciencias Forestales, Dr., Investigador Titular

<https://orcid.org/0000-0001-8449-8894> • perez.ramiro@inifap.gob.mx

Contribuição: Curación de datos, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Gestión del proyecto, Supervisión, Redacción

### 4 – Valentin José Reyes-Hernández

Biología y Manejo Forestal, PhD., Profesor-Investigador Adjunto

<https://orcid.org/0000-0002-1804-412X> • vareyhdz@gmail.com

Contribuição: Conceptualización, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción

### 5 – Ramón Razo-Zárate

Ciencias Ambientales, Dr., Profesor-Investigador Titular

<https://orcid.org/0000-0002-4608-3361> • ramon\_razo@uaeh.edu.mx

Contribuição: Metodología, Validación, Verificación, Redacción

## Cómo citar este artículo

Hernández-Ramos, J.; Ángeles-Pérez, G.; Pérez-Miranda, R.; Reyes-Hernández, V. J.; Razo-Zárate, R. Morfometría de copa para *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. Y *Quercus rugosa* Née en Hidalgo, México. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1418-1438, 2022. DOI 10.5902/1980509865276. Disponible en: <https://doi.org/10.5902/1980509865276>.