



Madera y bosques

ISSN: 1405-0471

ISSN: 2448-7597

Instituto de Ecología A.C.

Guzmán-Santiago, Juan Carlos; Aguirre-Calderón, Oscar Alberto; Vargas-Larreta, Benedicto; Gómez-Cárdenas, Martín; De los Santos-Posadas, Héctor Manuel; Quiñonez-Barraza, Gerónimo; Marroquín-Morales, Pablo  
Ecuaciones de calidad de sitio para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México  
Madera y bosques, vol. 27, núm. 3, e2732232, 2021  
Instituto de Ecología A.C.

DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732232>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770807013>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



# Ecuaciones de calidad de sitio para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México

## Site quality equations for *Abies religiosa* in different regions of Mexico

Juan Carlos Guzmán-Santiago<sup>1\*</sup>, Oscar Alberto Aguirre-Calderón<sup>1</sup>, Benedicto Vargas-Larreta<sup>2</sup>, Martín Gómez-Cárdenas<sup>3</sup>, Héctor Manuel De los Santos-Posadas<sup>4</sup>, Gerónimo Quiñonez-Barraza<sup>5</sup> y Pablo Marroquín-Morales<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Pueblo Nuevo, Durango, México.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México.

<sup>4</sup> Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México, México.

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Durango, México.

<sup>6</sup> Universidad Autónoma de Chiapas. Huehuetán, Chiapas, México.

\* Autor de correspondencia. charly.230584@gmail.com

### RESUMEN

Las estimaciones de altura dominante o índice de sitio permiten evaluar la productividad del rodal del bosque y funcionan como una herramienta dentro del plan del manejo forestal para fines de aprovechamiento. Este trabajo tuvo como objetivo analizar curvas dinámicas de índice de sitio con el enfoque de diferencia algebraica generalizada (EDAG) en 12 Unidades de Manejo Forestal para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México. Se utilizaron 262 muestras de análisis troncales que provienen de árboles dominantes y codominantes, mismas que se ajustaron con el modelo de Richards mediante el enfoque EDAG por mínimos cuadrados ordinarios. Con este enfoque pueden ser expandidos los parámetros de tasas de crecimiento y asíntotas, permitiendo que más de un parámetro del modelo dependa de la calidad de sitio, haciendo más flexibles las curvas polimórficas con múltiples asíntotas. Así mismo, se corrigió la autocorrelación mediante la prueba estadística de Durbin Watson (DW). En general, para todos los sitios se obtuvieron ganancias significativas, al obtener errores menores a 1.2 m y coeficientes de determinación ajustados que explican más de 97 % de la varianza total de crecimiento en altura en función de la edad, así como valores de DW aproximados a 2 en el que rectifica los valores proporcionados por los criterios de información Akaike; lo cual es deseable para modelar datos con tendencia de crecimiento sin afectar las predicciones de índice de sitio. Las ecuaciones se recomiendan para elaborar estudios de planes de manejo de esta especie en distintos sitios para clasificar la productividad maderable.

**PALABRAS CLAVE:** altura dominante, bondad de ajuste, curvas polimórficas, enfoque de diferencias algebraicas generalizado, entidades federativas, muestreo destructivo.

### ABSTRACT

The estimates of dominant height or site index allow evaluating the productivity of forest stand and function as tool within the forest management plan for harvesting purposes. This work aimed to analyze dynamic site index curves with the generalized algebraic difference approach (GADA) in 12 Forest Management Units for *Abies religiosa* in different regions of Mexico. 262 stem analysis samples from dominant and codominant trees were used, which were fitted with the Richards model using the GADA by ordinary least squares. With this approach, the parameters of growth rates and asymptotes can be expanded, allowing more than one parameter of the model to depend on the quality of the site, making polymorphic curves with multiple asymptotes more flexible. Autocorrelation was also corrected using the Durbin Watson (DW) statistical test. In general, significant gains were obtained for all sites, obtaining errors of less than 1.2 m and adjusted coefficients of determination that explain more than 97% of the total variance of growth in height as a function of age, as the DW values approximate to 2 in which it rectifies the values provided by Akaike information criteria, which is desirable for modeling growth trend data without affecting site index predictions. The equations are recommended to develop management plans for this species at different sites to classify timber productivity.

**KEYWORDS:** dominant height, goodness of fit, polymorphic curves, generalized algebraic difference approach, federal entities, destructive sampling.

## INTRODUCCIÓN

La relación que existe entre diversos factores (económicos, ecológicos, culturales, entre otros) sobre el crecimiento y desarrollo de los bosques tienden a incidir de forma directa en la productividad del sitio; la misma que se puede explicar mediante la modelación matemática y estadística enfocada al sector forestal (Ahmadi y Alavi, 2016; Guzmán-Santiago, Aguirre-Calderón y Vargas-Larreta, 2020; Quiñonez-Barraza, Zhao, Santos-Posadas y Corral-Rivas, 2020), que brindan conocimiento sobre la producción y crecimiento de los árboles (Weiskittel, Hann, Kershaw y Vanclay, 2011).

La calidad de sitio estimada a partir de la productividad es un referente en el manejo forestal para la toma de decisiones, también lo es la selección de especies a cultivar para obtener un alto rendimiento en la cosecha de la masa forestal (Vargas-Larreta, Álvarez-González, Corral-Rivas y Aguirre Calderón, 2010; Baluarte-Vásquez y Álvarez-Gonzales, 2015; Sharma y Parton, 2018). Diéguez-Aranda *et al.* (2009) afirman que, en áreas de alta calidad de estación, la mayoría de las especies producen alto volumen maderable. Este alto potencial de incremento indica que el patrón de crecimiento en altura de los árboles con buen grosor o clases sociológicas (árboles dominantes y codominantes) está poco afectado por la densidad del rodal y de las distintas labores silviculturales (Clutter, Fortson, Pienaar, Brister y Bailey, 1983).

Los estudios de crecimiento en altura dominante en diversos rodales de México se remontan hasta la década de 1980 (Vargas-Larreta *et al.*, 2017) y, a pesar de que es uno de los temas más estudiados, aún sigue siendo de interés dado que existe una gran mezcla de especies creciendo en distintas condiciones de productividad (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015).

La productividad forestal se basa en el principio biológico y puede representar la calidad de sitio mediante un valor (índice de sitio) cuantitativo (Attis Beltrán, Chauchard y Martínez-Pastur, 2015; Hernández-Cuevas, Santiago-García, Santos-Posadas, Martínez-Antúnez y Ruiz-Aquino, 2018), donde el suelo y el clima juegan un papel importante al estar directamente relacionados

(Antón-Fernández, Mola-Yudego, Dalsgaard y Astrup, 2016), a la vez estos factores ambientales están en constante cambio (Yue, Mäkinen, Klädtke y Kohnle, 2014).

El índice de sitio (IS) es el valor de la altura dominante a una edad de referencia (Mora, Meza, Porras, Sandí y Aguilar, 2019; Castillo-López *et al.*, 2013), que puede incluir la altura promedio de árboles dominantes o codominantes a una edad apropiada para su comercialización (Sharma y Reid, 2018) y se utiliza para estimar la altura del rodal con la finalidad de evaluar la calidad y las condiciones del terreno.

El IS se estima de datos tomados en campo, que provienen de: parcelas permanentes de muestreo, parcelas de medición temporal y datos de análisis troncales. Diversos investigadores han utilizado información proveniente de parcelas temporales y de análisis troncales para el ajuste de ecuaciones de altura dominante (a-d), dado que reduce el tiempo y costo; sin embargo, no descartan como la mejor opción la de parcelas permanentes para modelar el efecto a-d (Allen y Burkhart, 2015; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2020).

Las curvas del IS generadas con este tipo de enfoques deben de cumplir con algunas características o propiedades que son: polimorfismo, pauta de crecimiento sigmoidal con un punto de inflexión, capacidad de alcanzar una asíntota horizontal a edades avanzadas, tener un sentido lógico (la altura dominante debe ser cero a la edad cero y la curva debe ser siempre creciente), ser invariantes con respecto al camino de simulación y con respecto a la edad de referencia (Bailey y Clutter, 1974).

Los métodos más utilizados para determinar la altura dominante e índice de sitio se basan en el enfoque de diferencias algebraicas (EDA O ADA) que involucra la sustitución de un parámetro del modelo base y expresarlo como una función del sitio (una combinación altura dominante-edad); sin embargo, su limitación se debe a que la mayoría de los modelos derivados son anamórficos o tienen una asíntota común (Cieszewski y Bailey, 2000); mientras que el modelo de diferencia algebraica generalizada (EDAG o GADA) ofrece una ventaja a la ecuación base, ya que puede ser expandida de acuerdo con



diversas teorías, como la tasa de crecimiento y asintota, haciendo que más de un parámetro de cada modelo dependa de la calidad de estación, y a la vez sea más flexible (Cieszewski, 2001, 2002, 2003).

En México se distribuye ampliamente una gran mezcla de especies con distintos estratos arbóreos (sobre todo incoetáneos), donde los estudios sobre productividad y crecimiento se practican en su mayoría para bosques de pino y encino al ser estos últimos altamente comerciales (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015). La especie en estudio también es considerada importante en el sector forestal en los diferentes enfoques: económico, ecológico, ambiental, social y sobre todo en la dinámica natural; lo cual dio justificación a este estudio (Guzmán-Santiago *et al.*, 2019).

## OBJETIVOS

La presente investigación tuvo como objetivo analizar curvas dinámicas de índice de sitio con la metodología EDAG en 12 Unidades de Manejo Ambiental (Umafor) para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Se tomó información de 12 Umafor en cinco entidades federativas, que son: Hidalgo (1303), Ciudad de México (1503, 1507, 1508, 1509, 1510), Michoacán (1604, 1605, 1607), Puebla (2105) y Tlaxcala (2901, 2902) (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2016).

### Tamaño de muestra

Se obtuvo información de análisis troncales de 262 árboles dominantes-codominantes, mediante el muestreo destructivo que consistió en derribar, seccionar y medir los árboles. Para cada árbol se registraron las siguientes variables: diámetro normal (Dn, cm) medido a 1.3 m sobre el nivel del suelo, que fue medido con cinta diamétrica de 1 cm de resolución y forcípula Haglof Mantax Blue de la misma resolución, mientras que la altura total (At, m) fue medida con un flexómetro, con una resolución de 1 mm. Las primeras mediciones se realizaron en dos secciones de

0.30 m por encima del tocón, posterior a eso, la siguiente sección fue en el diámetro normal (1.30 m), y después las secciones fueron cortadas de manera constante a 2.54 m de longitud hasta llegar a la punta del árbol. La información relevante para los análisis respectivos se presenta en la tabla 1.

### Estimación de las alturas verdaderas

En ocasiones, la altura del corte de la sección no coincide con el comienzo del año, dado que la altura de cada sección de corta suele ser sobreestimada; lo cual sesga los cálculos posteriores (Fabio, Frattegiani y Manetti, 1994). Para solucionar este problema se utilizaron el algoritmo de Carmean (1972) y la fórmula modificada por Newberry (1991) para la troza final, que han sido empleadas por varios investigadores (Dyer y Bailey, 1987; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015; Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

Los supuestos del método son dos: 1) el árbol crece a un ritmo constante entre dos secciones, 2) el corte se realiza, como media, en el centro del crecimiento en altura de un año. A continuación, se muestran las fórmulas empleadas para calcular la altura verdadera referente a cada parte del árbol.

$$\text{Tocón} \quad H_T = T \left( \frac{H_2}{N_1 - N_2 + 0.5} \right) \quad (1)$$

$$\text{Troza} \quad H_{T_0 + T} = H_1 + \left[ \left( \frac{H_2 + H_1}{2 * (N_1 - N_2)} \right) + (T - 1) * \left( \frac{H_2 + H_1}{(N_1 - N_2)} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{Punta} \quad H_{T_0 + T} = H_1 + \left[ \left( \frac{H_2 + H_1}{2 * (N_1 - 0.5)} \right) + (T - 1) * \left( \frac{H_2 + H_1}{(N_1 - 0.5)} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

$H_1$  y  $H_2$  = alturas de las secciones inferior y superior de la troza

$N_1$  y  $N_2$  = número de anillos de las secciones inferior y superior de la troza

$N_0$  = edad del árbol, es decir el número de anillos del tocón (en el tocón  $N_0 = N_1$ )

$T_0$  = edad del árbol cuando alcanzó la altura  $H_1$ , es decir  $N_0 - N_1$

$T$  = número entero de 1 a  $N_1 - N_2$

TABLA 1. Estadísticos descriptivos de las variables utilizadas

<i>Umafor</i>	<i>Núm. de árboles</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Promedio</i>	<i>Máximo</i>	<i>Desviación estándar</i>
Altura total (m)					
1303	26	14.50	32.95	42.10	5.97
1503	13	24.60	31.77	38.30	4.79
1507	14	20.32	32.68	40.61	5.79
1508	23	17.80	26.79	44.55	7.54
1509	20	22.30	34.47	42.00	5.85
1510	27	17.00	25.91	50.00	6.27
1604	29	23.20	32.71	43.00	4.25
1605	11	25.49	31.06	37.58	4.46
1607	29	10.75	25.44	36.00	7.63
2105	8	27.60	31.72	35.10	2.41
2901	36	13.40	24.00	39.20	6.79
2902	26	9.10	20.57	33.30	6.53
Diámetro normal (cm)					
1303	26	16.00	43.42	60.20	11.00
1503	13	41.00	55.00	75.00	9.92
1507	14	31.00	52.73	85.50	14.13
1508	23	29.00	49.48	79.00	13.24
1509	20	43.00	55.29	74.95	9.06
1510	27	27.00	50.56	83.00	16.76
1604	29	37.00	51.26	69.00	7.78
1605	11	44.00	53.36	61.00	5.16
1607	29	8.00	43.77	92.30	18.46
2105	8	30.80	47.57	68.70	13.00
2901	36	22.70	40.34	62.50	9.83
2902	26	18.20	33.46	86.50	17.06
Edad (años)					
1303	26	47.00	84.00	131.00	21.00
1503	13	34.00	50.00	88.00	16.00
1507	14	38.00	58.57	84.00	12.00
1508	23	26.00	58.26	126.00	28.00
1509	20	32.00	63.80	82.00	12.00
1510	27	30.00	59.96	85.00	16.00
1604	29	36.00	57.06	75.00	10.00
1605	11	36.00	56.72	96.00	20.00
1607	29	16.00	38.93	76.00	15.00
2105	8	54.00	75.62	115.00	21.00
2901	36	39.00	83.55	106.00	15.00
2902	26	25.00	52.00	114.00	23.00



## Metodología EDAG

El enfoque de diferencias algebraicas generalizada (EDAG o GADA) consiste en seleccionar la ecuación base e identificar los parámetros específicos del sitio. Posteriormente debe definirse de forma explícita cómo cambian los parámetros entre las distintas estaciones, para después reemplazarlos con las funciones explícitas de X, que es una variable independiente oculta que describe la productividad del sitio (resultado de factores ambientales y las prácticas de manejo y silvicultura) y nuevos parámetros.

En esta investigación se utilizó el modelo de Richards (1959), la cual es flexible al tener una asíntota horizontal, presenta un patrón de crecimiento sigmoide, así como un punto de inflexión al modelar una relación altura dominante-edad.

Su forma general es la siguiente:

$$H = a_1 \left[ 1 - e^{a_2 * t} \right]^{a_3} \quad (4)$$

Donde:

$H$  = altura dominante (m)

$t$  = edad (años)

$a_1, a_2, a_3$  = parámetros del modelo

Por otra parte, la notación general de las formulaciones EDAG,  $a_1, \dots, a_n$  se refieren a los parámetros del modelo base (parámetros locales que cambian de un sitio a otro), mientras que  $b_1, \dots, b_m$  son los parámetros globales que permanecen constantes para todos los sitios. A continuación, se cita la expresión del modelo.

$$Y = f(t, t_0, Y_0, b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (5)$$

Donde:

$Y$  = es el valor de la función a la edad  $t$

$Y_0$  = variable de referencia definida como el valor de la función a la edad  $t_0$ .

A continuación, se deriva el modelo polimórfico con múltiples asíntotas (Ec. 4), en el cual más de un parámetro debe de ser una función de la productividad del sitio. Según

Cieszewski (2004) no es posible obtener una ecuación de un modelo EDAG donde el parámetro  $a_2$  varíe con la calidad de sitio, ya que cuando  $a_1$  o  $a_3$  es una función de  $X$  y el parámetro  $a_2$  también es una función  $X$ , el modelo no puede ser resuelto para  $X$ .

Tomando en cuenta lo anterior, se concluye que la ecuación obtenida de Richards (1959) con la expresión EDAG, los parámetros  $a_1$  (asíntota) y  $a_3$  pueden considerarse dependientes de la calidad de estación ( $X$ ). La expresión de la relación es la siguiente.

$$a_1 = X, \quad a_3 = b_2 + \frac{b_3}{X} \quad \text{y} \quad a_2 = b_1 \quad (6)$$

De esta manera, la ecuación de Richards se reestructura de la siguiente forma para dos pares de valores de altura dominante y edad.

$$H_0, t_0 \Rightarrow H_0 = e^{x} * \left( 1 - e^{-b_1 * t_0} \right)^{b_2 + \frac{b_3}{X}} \quad (7)$$

$$H_1, t_1 \Rightarrow H_1 = e^{x} * \left( 1 - e^{-b_1 * t_1} \right)^{b_2 + \frac{b_3}{X}}$$

Donde:

$H_0$  = altura dominante a la edad inicial  $t_0$

$H_1$  = altura dominante a la edad  $t_1$

Al despejar y agregar el logaritmo en ambos lados de la primera de las igualdades, se logra obtener expresión siguiente.

$$\ln(H_0) = X + \left( b_2 + \frac{b_3}{X} \right) * \ln \left( 1 - e^{-b_1 * t_0} \right) \quad (8)$$

La solución  $X$  involucra las raíces de una ecuación cuadrática, y posteriormente se selecciona la función de la raíz más adecuada y se sustituye en la segunda expresión de la ecuación 7. De lo anterior, se deriva el polinomio de segundo grado en función de  $X$  el cual se puede despejar. El valor de  $X$  en la ecuación anterior,  $t_0$  y  $H_0$  toma los valores condicionales iniciales siguiente:

$$H_0 = \frac{1}{2} \left\{ \ln(H_0) \cdot b_2 L_0 \pm \sqrt{[b_2 L_0 \cdot \ln(H_0)]^2 - 4 b_3 L_0} \right\} \quad (9)$$

donde

$$L_0 = \ln \left[ 1 \cdot e^{(-b_1 \cdot t_0)} \right]$$

La selección del valor de  $X_0$ , involucra el valor positivo de la raíz cuadrada para luego sustituirla en segunda igualdad de las ecuaciones 7 con la finalidad de obtener la expresión EDAG, y así obtener las curvas dinámicas con polimorfismo y múltiples asíntotas (Ec. 10).

$$H_1 = H_0 * \left[ \frac{1 \cdot e^{b_1 \cdot t_1}}{1 \cdot e^{b_1 \cdot t_0}} \right]^{b_2 + \frac{b_3}{X}} \quad (10)$$

Donde:

$X_0$  = está dada por la Ec. 5,  $b_1, b_2, b_3$  = parámetros globales

### Método de ajustes

Se utilizó el método invariante denominado iterativo respecto a la edad de referencia, donde estima los efectos del sitio y a la vez asume que los datos contienen errores de medición y aleatorios (Cieszewski, 2003; Diéguez-Aranda, Álvarez González, Barrio-Anta y Rojo-Alboreca, 2005), dado que es ideal para base de datos grandes (Vargas-Larreta *et al.*, 2010). Un primer paso consistió en la estimación de los parámetros globales, el cual considera de manera constante el parámetro local  $H_0$ , el cual varía en cada árbol (se le asigna al principio la altura media observada a una edad base). Posteriormente, los valores estimados se tomaron como constantes y el parámetro  $H_0$  se estimó para cada árbol, y ser ajustado una vez más, utilizando como valor inicial para los parámetros locales la altura observada a la mitad de la edad del árbol. En seguida el valor estimado de cada árbol del parámetro local es una constante y, este se ajusta nuevamente para obtener nuevos parámetros globales.

Finalmente, el procedimiento se repite hasta que los parámetros globales queden estabilizados con valores significativos ( $p < 0.0001$ ) y por ende haya una reducción de los errores (raíz del error medio cuadrático [REMC]) a

través de varias iteraciones de manera consecutiva. El modelo de Richards fue ajustado con el procedimiento PROC MODEL del software System Statistical Analysis [SAS] (2008), mediante la técnica de mínimos cuadrados ordinarios. Así mismo realizó la corrección de la autocorrelación (una relación entre los valores separados el uno del otro por un intervalo de tiempo dado) en los residuos (errores de predicción), para lo cual se utilizó el test de Durbin Watson (1971) ( $d$ ), donde  $d$  es un valor comprendido entre 0 y 4; si el valor del estadístico  $d$  es próximo a 2,  $p = 0$  (significa que no hay correlación), si se aproxima a 4,  $p < 0$  y si se aproxima 0,  $p > 0$ .

### Estadísticos de bondad de ajustes analizados

Los resultados obtenidos de cada ecuación fueron analizados mediante escalas numéricas y gráficas. A través de los residuales generados en la fase de ajuste se calcularon los estadísticos siguientes: el coeficiente de determinación ( $R^2_{adj}$ ), el cual es deseable que alcance el valor de 1; en cuanto a REMC, es conveniente que tome el valor de cero. Por otra parte, el criterio de información akaike (CIA) se considera apropiado porque presenta un menor valor (Del Carmen-García, Castellana, Rapelli, Koegel y Catalano, 2014). La característica del sesgo ( $\bar{e}$ ), es que busca que el promedio de los residuales sea igual a cero, con lo que se logra que el estimador sea centrado o insesgado (Amat-Rodrigo, 2016).

La expresión de los estadísticos de bondad de ajuste es la siguiente:

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \left[ \frac{n - 1}{n - p - 1} \right] \quad (11)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad (12)$$

$$CIA = n * \ln(SCR) + 2(p + 1) - n * \ln(n) \quad (13)$$



$$(\bar{e}) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (14)$$

Donde:

- SCR = suma de cuadrado del error  
 p = número de parámetros a estimar,  
 n = es el tamaño de muestra  
 ln = logaritmo natural  
 $Y_i$  = valores observados  
 $\hat{Y}_i$  = valores predichos  
 $\bar{Y}_i$  = valores promedio

## RESULTADOS

### Ecuación dinámica

De acuerdo con la prueba de t-Student, los parámetros fueron estadísticamente significativos con valores de  $p < 0.0001$ , menores al valor crítico ( $\alpha = 0.05$ ); lo cual da certeza que el modelo de Richards es capaz de describir el patrón de crecimiento en altura dominante ( $H_0$ ) a una cierta edad de referencia para calificar los niveles de productividad, sin afectar las predicciones de índice de sitio (IS) o  $H_0$  en la modalidad polimórfica en las 12 Umafor, y que es corroborado por el análisis gráfico. De esta manera se describe que en la investigación se obtuvieron sesgos menores a 1 m, así como REMC menores a 1.2 m con coeficientes de determinación ajustados ( $R^2_{adj}$ ) que explican más de 97% de la varianza total del crecimiento de la altura en función a la edad. Además, se obtuvieron CIA convincentes y valores de Durbin Watson aproximados a 2, que indican que no existe autocorrelación en forma general. Al utilizar el método EDAG o GADA, la ecuación base puede ser expandida sobre el crecimiento, lo cual hace que más de un parámetro del modelo dependa de la calidad de sitio con curvas a la vez flexibles y de múltiples asíntotas (Tabla 2).

### Familias de curvas de índice de sitio

Con base en los análisis estadísticos, se puede apreciar que el modelo describe adecuadamente el crecimiento en altura de forma biológica y se apega a las condiciones de diferentes niveles de productividad o índice de sitio. Así también,

genera polimorfismo asintótico plausible al tener un punto de inflexión, así como predicciones de manera consistente e invariante de la edad de referencia.

En la figura 1 se aprecian las curvas obtenidas para los diferentes índices para cada Umafor a una edad base de 50 sobreuestas en los gráficos de perfil de los árboles empleados en el ajuste, donde se muestra que las curvas siguen una trayectoria de los datos en los rangos de edades y que describen el crecimiento en un sentido biológico para las edades correspondientes. La edad base fue determinante para evitar discrepancias, dado que en edades jóvenes suelen ser susceptibles en los cambios ambientales. La calificación de los índices de sitio (IS) fue calidad baja (III), media (II) y alta (I).

Las calidades de sitio que se establecieron fueron variantes en las unidades de manejo, por lo que la escala cambió de un índice de sitio a otro, tomando los valores de 7 m, 8 m, 9 m, 10 m y 12 m. Las curvas presentaron buenos ajustes debido a la generalización del modelo, lo que permite observar curvas polimórficas con múltiples asíntotas. En este sentido, se destacan algunas características propias de las Umafor, donde la 1503 (B) y 1507 (C) son las que presentaron valores de IS más altos, y para los sitios de 2901 (K) inició desde los 5 (IS, m), seguida por la 2902 (L) partiendo de los 8 m. Así mismo, las asíntotas en sitios ricos (I) ocurren en su mayoría de 100 años en adelante como resultado de su ritmo de crecimiento (Fig. 1).

### Análisis de residuos

Después de que se realizó el análisis estadístico del modelo, se puede complementar su pertinencia mediante el análisis gráfico; considerado como la forma más eficiente para evaluar la eficiencia. Con el método iterativo la expresión EDAG permitió el ajuste simultáneo, así como la comparación de la tasa de cambio, lo que permitió obtener excelentes resultados para cada Umafor, ya que se observa un patrón aleatorio de los residuos alrededor de la línea cero (modelo), evidenciando una varianza constante en las predicciones a distintas alturas (Fig. 2).

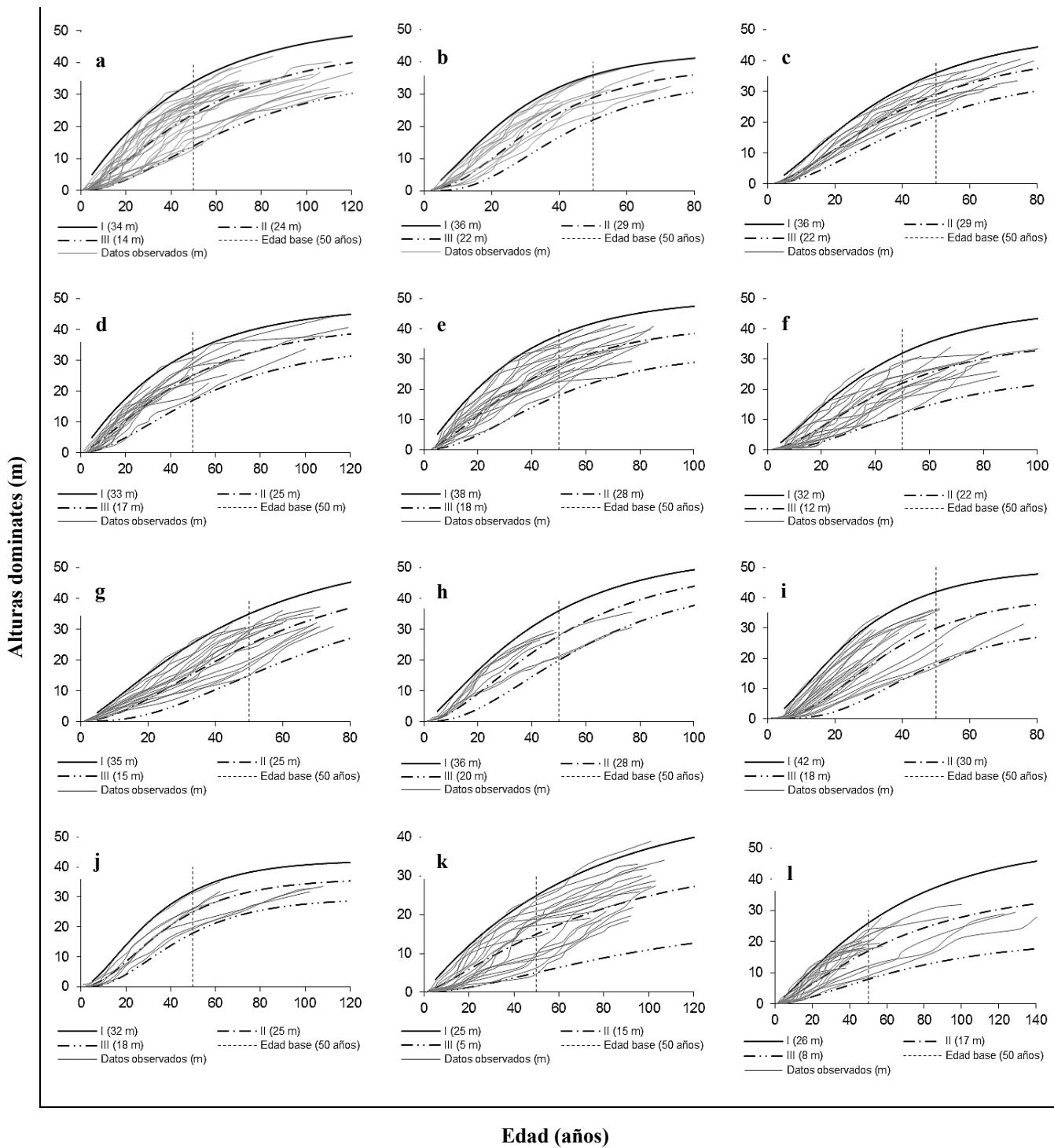


FIGURA 1. Curvas de índice de sitio, donde: a=1303, b=1503, c=1507, d=1508, e=1509, f=1510, g=1604, h=1605, i=1607, j=2105, k=2901, l=2902



TABLA 2. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de índice de sitio

Umafor	Estimadores de parámetros			Errores estándar			Bondad de ajustes				
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	Sesgo (m)	REMC (m)	$R^2_{adj}$	CIA	Durbin Watson
1303	0.0215	-11.2831	48.7592	0.0012	0.9194	3.4411	-0.0083	1.140	0.989	119.405	1.7945
1503	0.0450	-34.4025	135.4675	0.0034	12.3273	45.1754	0.0065	0.897	0.992	-35.165	1.8204
1507	0.0331	-6.9173	32.9345	0.0024	1.6064	6.0675	0.0004	0.880	0.994	-44.907	1.9375
1508	0.0245	-11.2692	47.5785	0.0017	3.6285	13.5964	-0.0479	1.077	0.988	42.953	1.6873
1509	0.0312	-9.0155	39.8650	0.0023	2.1371	8.0381	0.0038	1.244	0.988	127.794	1.7303
1510	0.0298	-5.0960	25.3848	0.0032	1.6802	6.0527	0.0106	1.608	0.969	303.256	1.8010
1604	0.0258	-23.1380	98.1074	0.0021	4.4548	17.7117	0.0408	0.933	0.993	-51.509	1.7900
1605	0.0295	-18.3545	75.3568	0.0030	5.3515	19.7033	-0.0153	0.774	0.993	-70.247	1.6665
1607	0.0473	-23.3945	98.1925	0.0028	3.7178	13.8686	-0.0290	0.821	0.994	-80.077	2.1486
2105	0.0389	-11.7544	50.7659	0.0025	3.0581	11.0711	0.0149	0.681	0.996	-91.401	1.9382
2901	0.0150	-1.9402	11.4717	0.0019	0.3729	1.3434	-0.0702	1.175	0.983	169.141	1.6599
2902	0.0165	-16.9370	67.0074	0.0019	4.2031	14.9784	-0.0353	1.226	0.978	102.709	1.8018

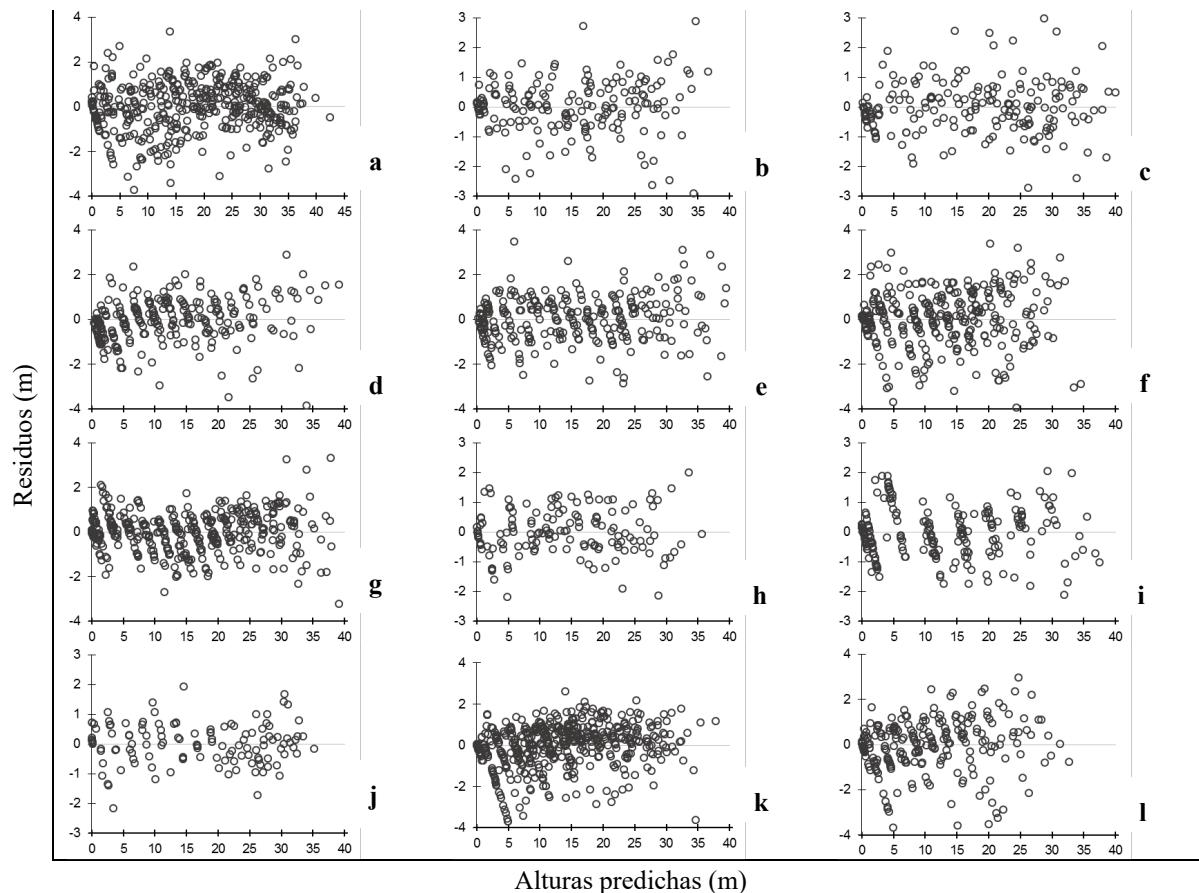


FIGURA 2. Residuales vs predichos, donde: a=1303, b=1503, c=1507, d=1508, e=1509, f=1510, g=1604, h=1605, i=1607, j=2105, k=2901, l=2902.

## DISCUSIÓN

La calidad en la bondad de ajuste obtenida en la investigación fue adecuada. Distintos autores revelan la ganancia significativa que se tiene al utilizar el método EDAG para la predicción y proyección del crecimiento a edades mayores a la utilizada. En este sentido, Vargas-Larreta *et al.* (2017) encontraron excelentes resultados para 97 especies incluidas de bosques tropicales y templados en México, mismas que se encuentra disponible en la plataforma digital denominado Sistema Biométrico Forestal [SiBiFor] (2016). En dicha investigación se observa que las bondades de ajustes referentes a los coeficientes ( $R^2_{adj}$ ) así como la REMC comparten información similar respecto a *Abies religiosa*. De igual forma, se aporta información nueva para las Umafor 1510 (Ciudad de México), y la 2105 de Puebla. Los sistemas, en forma EDAG de crecimiento en altura dominante e índice de sitio son preferibles en los trabajos de manejo, así como en la planeación forestal (Kahriman, Sönmez y Gadow, 2018).

En este estudio se demuestra que el modelo de Richards es ligeramente superior estadísticamente a la ecuación de Korf polimórfico reportada en la plataforma SiBiFor para la región 1508 de México, sobre todo al reducir el error (REMC) utilizando la edad de referencia de 50 años. Debido a lo anterior, Vargas-Larreta, Aguirre-Calderón, Corral-Rivas, Crecente-Campo, y Diéguez-Aranda (2013) recomiendan seleccionar una edad base mayor para no generar inconvenientes, ya que en edades jóvenes la clasificación de la calidad de sitio muchas veces puede verse afectada la estimación de la altura total por las condiciones ambientales.

Los factores ambientales, el manejo silvícola, así como las características genéticas de las especies, tienden a influir en los patrones de crecimiento entre los sitios (Montero, Ugalde y Kanninen, 2001; Mora, Muñoz, Meza y Fonseca, 2015; Camacho, Alvarado y Fernández-Moya, 2016; Camacho, Alvarado y Fernández-Moya, 2017). Yilmaz (2019) concluye que el índice de sitio varía con la altitud y el grado de inclinación de la región, por lo cual es importan-

te el conocimiento en las áreas potenciales para el manejo y sobre todo para el establecimiento de plantaciones.

El propósito de conocer el patrón de crecimiento en altura dominante de los árboles es para calificar la productividad del sitio y no solo para predecir la altura del rodal a una edad de referencia (Clutter *et al.*, 1983; Hernández-Ramos *et al.*, 2015). De acuerdo con García (2011) y Vargas-Larreta *et al.* (2017), los sistemas de cómputo son herramientas indispensables, ya que ofrecen la ventaja para simular la dinámica forestal, y de esta forma los manejadores de bosques puedan utilizar el sistema de ecuaciones para definir los regímenes ideales para la especie en estudio.

Stankova y Diéguez-Aranda (2012), Galindo-Soto, Vargas-Larreta, Hernández y Cruz-Cobos (2017), Westfall, Hatfield, Sowers y O'Connell (2017) y Hernández-Cuevas *et al.* (2018) obtuvieron resultados similares a los de esta investigación sobre la capacidad de precisión del modelo con este enfoque (Stankova y Diéguez-Aranda, 2012), evidenciando la gran flexibilidad que tiene (Tang *et al.*, 2016); en donde las curvas permiten clasificar los bosques naturales con base en su potencial, mediante las condiciones de manejo de distintas especies (Delgado-Caballero *et al.*, 2009).

Este método fue empleado también en el trabajo de Quiñonez-Barraza *et al.* (2015) que obtuvo excelentes resultados para especies de *Pinus arizonica*, *P. durangensis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, y *P. ayacahuite* en rodales mezclados con la misma edad de referencia (60 años). Tamarit-Urias, Santos-Posadas, Aldrete, Valdez-Lazalde y Ramírez-Maldonado (2014) difundieron sus aportaciones científicas sobre las plantaciones de *Tectona grandis* en Campeche, México. De igual forma Rodríguez-Carrillo, Cruz-Cobos, Vargas-Larreta y Hernández (2015) encontraron altos ajustes estadísticos sobre táscale (*Juniperus deppeana* Steud.), lo mismo que Castillo-López *et al.* (2013) al estudiar *Pinus arizonica*, *P. durangensis*, *P. leiophylla* y *P. teocote*; ambos realizados en Durango. Las investigaciones de Carrero, Jerez, Macchiavelli, Orlandoni y Stock (2008) y de Attis-Beltrán *et al.* (2015) para especies de *Eucalyptus urophylla* y bosques mixtos de *Nothofagus alpina* y *N. obliqua* (Neuquén,



Argentina), reportan resultados similares a los obtenidos en este trabajo.

## CONCLUSIONES

El modelo de Richards, utilizado mediante la metodología EDAG, mostró buenos resultados en cuanto a la bondad de ajuste para modelar las curvas de índice de sitio de altura dominante-edad para *Abies religiosa* con base en las diferentes escalas de cambio; ya que este modelo considera las características biológicas, por lo que le facilita describir las relaciones que existen entre las variables en un sentido biológico.

Las ecuaciones generadas son de tipo polimórfico con múltiples asíntotas, invariante con respecto a la edad base, por lo que estiman de forma directa la altura dominante y el índice de sitio a cualquier edad o altura.

Mediante muestras de análisis troncales se obtuvieron resultados verídicos, por lo que se recomienda el uso de esta técnica para investigaciones de otras especies.

Las expresiones matemáticas son recomendables para ser empleadas en estudios de planes de manejo, para clasificar la productividad maderable de rodales de distintas edades y pueden incorporarse en modelos de rendimiento y crecimiento de las distintas regiones.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Benedicto Vargas Larreta, investigador del Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, por aportar la información de campo para este trabajo. De igual forma se le agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por apoyo económico durante la etapa de estudiante.

## REFERENCIAS

- Ahmadi, K., & Alavi, S. J. (2016). Generalized height-diameter models for *Fagus orientalis* Lipsky in Hyrcanian forest, Iran. *Journal of forest science*, 62(9), 413-421. doi: 10.17221/51/2016-JFS
- Allen, M. G., & Burkhardt, H. E. (2015). A comparison of alternative data sources for modeling site index in loblolly pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(8), 1026-1033. doi:10.1139/cjfr-2014-0346
- Amat-Rodrigo, J. (2016). Selección de predictores y mejor modelo lineal múltiple. RPubs. Madrid, España. 83 p.
- Antón-Fernández, C., Mola-Yudego, B., Dalsgaard, L., & Astrup, R. (2016). Climate-sensitive site index models for Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(6), 794-803. doi:10.1139/cjfr-2015-0155
- Attis Beltrán, H., Chauchard, L. M., & Martínez Pastur, G. (2015). Curvas preliminares de índice de sitio para bosques puros y mixtos de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en la Patagonia Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 275-285. doi:10.4067/S0717-92002015000200013
- Bailey, R. L., & Clutter, J. L. (1974). Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science*, 20(2), 155-159. doi: 10.1093/forestscience/20.2.155
- Baluarte-Vásquez, J. R., & Álvarez-Gonzales, J. G. (2015). Modelamiento del crecimiento de tornillo *Cedrela catenaeformis* Ducke en plantaciones en Genaro Herrera, departamento de Loreto, Perú. *Folia Amazónica*, 24(1), 21-32. doi:10.24841/fa.v24i1.57
- Camacho, M. E., Alvarado, A., & Fernández-Moya, J. (2016). *Vochysia guatemalensis* Donn. Smith, an alternative species for reforestation on acid tropical soils. *New Forests*, 47(4), 497-512. doi:10.1007/s11056-016-9527-7.
- Camacho, M. E., Alvarado, A., & Fernández-Moya, J. (2017). Accumulation and export of nutrients in harvested wood of *Vochysia guatemalensis* in small-scale forest plantations. *Journal of Tropical Forest Science*, 29(1), 105-113. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/44028279>.
- Carmean, W. H. (1972). Site index curves for upland oaks in the Central States. *Forest Science*, 18(2), 109-120. doi:10.1093/forestscience/18.2.109
- Carrero, O., Jerez, M., Macchiavelli, R., Orlandoni, G., & Stock, J. (2008). Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia*, 33(4), 265-272. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/33933406>
- Castillo-López, A., Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Hernández, F. J. (2013). Modelo compatible altura-índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiaro, Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(18), 89-103. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322013000400007&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000400007&lng=es&tlng=en)
- Cieszewski, C. J. (2001). Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves.

- Canadian Journal of Forest Research, 31(1), 165-173. doi:10.1139/x00-132
- Gieszewski, C. J. (2002). Comparing fixed- and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *Forest Science*, 48(1), 7-23. doi:10.1093/forestscience/48.1.7
- Gieszewski, C. J. (2003). Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function  $Y3 = (axm)/(c + xm-1)$ , a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *Forest Science*, 49(4), 539-554. doi: 10.1093/forestscience/49.4.539
- Gieszewski, C. J. (2004). GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and other exponential functions. *University of Georgia PMRC-TR*, 5, 2004. Athens, Georgia. 16 p.
- Gieszewski, C. J., & Bailey, R. L. (2000). Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science*, 46(1), 116–126. doi: 10.1093/forestscience/46.1.116
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, H. G., & Bailey, R. L. (1983). Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2010). Programa de Fomento a la Organización Social, Planeación y Desarrollo Regional Forestal Priorización por Umafor
- Del Carmen-García, M., Castellana, N., Rapelli, C., Koegel, L., & Catalano, M. (2014). Criterios de información y predictivos para la selección de un modelo lineal mixto. *SaberEs*, 6, 61–76. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5515546>
- Delgado-Caballero, C. E., Gómez-Guerrero, A. J., García-Salazar, A., Valdez-Lazalde, J. R., Santos-Posada, H. M., Fierros-González, A. M., & Horwath, W. R. (2009). Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* en el sureste de México. *Agrociencia*, 43(1), 61-72. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952009000100007&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000100007&lng=es&tlng=en)
- Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J. G., Barrio-Anta, M., & Rojo-Alboreca, A. (2005). Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain). *Annals of Forest Science*, 62(2), 143-152
- Diéguez-Aranda, U., Rojo-Alboreca, A., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., ...Sánchez-Rodríguez, F. (2009). Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Dirección Xeral de Montes, Consellería de Medio Rural. Galicia, España. 273 p. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Alberto\\_Rojo-Alboreca/publication/312219888\\_Herramientas\\_selvicolas\\_para\\_la\\_gestion\\_forestal\\_sostenible\\_en\\_Galicia/links/5dc3e886299bf1a47b1c194b/Herramientas-selvicolas-para-la-gestion-forestal-sostenible-en-Galicia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Rojo-Alboreca/publication/312219888_Herramientas_selvicolas_para_la_gestion_forestal_sostenible_en_Galicia/links/5dc3e886299bf1a47b1c194b/Herramientas-selvicolas-para-la-gestion-forestal-sostenible-en-Galicia.pdf)
- Durbin, J., & Watson, G. S. (1971). Testing for serial correlation in least squares regression. III. *Biometrika*, 58(1), 1-19. doi: 10.1093/biomet/58.1.1
- Dyer, M. E. & Bailey, R. L. (1987). A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *Forest Science*, 33(1), 3-13. doi:10.1093/forestscience/33.1.3.
- Fabbio, G., Frattegiani, M., & Manetti, M. C. (1994) Height estimation in stem analysis using second differences. *Forest Science*, 40(2), 329-340. doi:10.1093/forestscience/40.2.329
- Galindo-Soto, J. E., Vargas-Larreta, B., Hernández, F. J., & Cruz-Cobos, F. (2017). Modelo compatible altura dominante - índice de sitio para mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. et Bonpl. ex Willd) del semidesierto de Durango. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 16(1), 23-31. doi:10.5154/r.rchszza.2015.10.16
- García, O. (2011). Dynamical implications of the variability representation in site-index modelling. *European Journal of Forest Research*, 130(4), 671–675. doi:10.1007/s10342-010-0458-0
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B., ...Santos-Posada, H. M. (2019). Relación altura-diametro para *Abies religiosa* Kunth Schltdl. & Cham. en el centro y sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 100–120. doi:10.29298/rmcf.v10i52.483
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., & Vargas-Larreta, B. (2020). Forest volume estimation techniques with special emphasis on the tropics. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 291-306. doi:10.5154/r.rchscfa.2019.07.061
- Hernández-Cuevas, M., Santiago-García, W., Santos-Posadas, H. M., Martínez-Antúnez, P., & Ruiz-Aquino, F. (2018). Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Agrociencia*, 52(3), 437-453. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000300437&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000300437&lng=es&tlng=es)
- Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J. J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Muñoz-Flores, H. J., & Samperio-Jiménez, M. (2015). Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 24-37. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322015000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000100003&lng=es&tlng=es)



- Kahriman, A., Sönmez, T., & Gadow, K. V. (2018). Site index models for Calabrian pine in the central Mediterranean region of Turkey. *Journal of Sustainable Forest*, 37(5), 459–474. doi:10.1080/10549811.2017.1421086
- Montero, M., Ugalde, L., & Kanninen, M. (2001). Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. f. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 35, 13-18
- Mora, F., Meza, V., Porras, Á., Sandí, C., & Aguilar, L. (2019). Curvas diferenciadas de índice de sitio para *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte y Huetar Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(2), 123-138. doi:10.15517/RAC.V43I2.38203
- Mora, F.; Muñoz, R., Meza, V., & Fonseca, W. (2015). Factores edáficos que influyen en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 71-89. Recuperado de [www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html)
- Newberry, J. D. (1991). A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. *Forest Science*, 37(1), 368-369. doi:10.1093/forestscience/37.1.368
- Quiñonez-Barraza, G., Santos-Posadas, H. M., Cruz-Cobos, F., Velázquez-Martínez, A., Ángeles-Pérez, G., & Ramírez-Valverde, G. (2015). Índice de sitio con polimorfismo complejo para masas forestales de Durango, México. *Agrociencia*, 49(4), 439-454. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952015000400007&lng=es&tlang=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400007&lng=es&tlang=es)
- Quiñonez-Barraza, G., Zhao, D., Santos-Posadas, H. M., & Corral-Rivas, J. J. (2020). An approximate height growth and site index model for *Quercus sideroxyla* Bonpl. in mixed-species stands of Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 53-69. doi:10.5154/r.rchscfa.2019.03.025
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290-300. doi:10.1093/jxb/10.2.290
- Rodríguez-Carrillo, A., Cruz-Cobos, F., Vargas-Larreta, B., & Hernández, F. J. (2015). Compatible dominant height - site index model for juniper (*Juniperus deppeana* Steud.). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(1), 97–108. doi:10.5154/r.rchscfa.2014.09.041
- Sharma, M., & Parton, J. (2018). Climatic effects on site productivity of red pine plantations. *Forest Science*, 64(5), 544–554. doi:10.1093/forsci/fxy013
- Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor). (2016). Biblioteca digital del sistema biométrico para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México. Recuperado de <http://fcfposgrado.ujed.mx/sibifor/inicio/buscar.php>
- Stankova, T., & Diéguez-Aranda, U. (2012). A tentative dynamic site index model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Bulgaria. *Silva Balkanica*, 13(1), 5-19. Recuperado de [https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/46322731/Productivity\\_of\\_roadside\\_processing\\_syst20160607-7941-by4csh.pdf](https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/46322731/Productivity_of_roadside_processing_syst20160607-7941-by4csh.pdf)
- System Statistical Analysis (SAS). (2008). SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. Raleigh, NC, EE. UU., SAS Institute Inc. s/p. Recuperado de <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm>
- Tamarit-Urias, J. C., Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Maldonado, H. (2014). Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. *Agrociencia*, 48(2), 225-238. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952014000200008&lng=es&tlang=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000200008&lng=es&tlang=es)
- Tang, X., Pérez-Cruzado, C., Torsten, V., Fehrmann, L., Álvarez-González, J. G., & Kleinn, C. (2016). Development of a compatible taper function and stand-level merchantable volume model for Chinese fir plantations. *Forestry*, 11(1), 1-15. doi:10.1371/journal.pone.0147610
- Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., Crecente-Campo, F., & Diéguez-Aranda, U. (2013). Modelo de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el noreste de México. *Agrociencia*, 47(1), 91-106. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952013000100008&lng=es&tlang=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000100008&lng=es&tlang=en)
- Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas, J. J., & Aguirre Calderón, Ó. A. (2010). Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista fitotecnia mexicana*, 33(4), 343-350. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802010000400012&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000400012&lng=es)
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., ... Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. doi:10.5154/r.rchscfa.2017.06.040
- Weiskittel, A.R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). Forest site evaluation. P. 37-52 in Forest Growth and Yield Modeling. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK.

Westfall, J. A., Hatfield, M. A., Sowers, P. A., & O'Connell, B. M. (2017). Site index models for tree species in the Northeastern United States. *Forest Science*, 63(3), 283– 290. doi: 10.5849/FS-2016-090

Yilmaz, M. (2019). Effects of soil and environmental factors on the site productivity of pure Oriental beech forests in Akkuş Region of Turkey. *Eurasian Journal of Forest Science*, 7(2), 107-120. doi: 10.31195/ejefs.527905

Yue, C., Mäkinen, H., Klädtke, J., & Kohnle, U. (2014). An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on spatially and temporally disjunct measurement series. *Forest Ecology and Management*, 323, 10–19. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.031

Este documento se debe citar como:

Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenes, M., De los Santos-Posadas, H. M., Quiñonez-Barraza, G., & Marroquín-Morales, P. (2021). Ecuaciones de calidad de sitio para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732232 doi:10.21829/myb.2021.2732232

Manuscrito recibido el 28 de julio de 2020

Aceptado el 20 de abril de 2021

Publicado el 23 de diciembre de 2021



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.