http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Tittle Paper/Título del artículo:

Índice de sitio para plantaciones de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., en Michoacán, México

Site index for *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., plantations in Michoacan, Mexico

Authors/Autores: Barrera-Ramírez, R., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J. García-Cuevas, X., Sáenz-Reyes J. T.

ID: e1674

DOI: https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Received/Fecha de recepción: May 20 th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: May 09 th 2025

Available online/Fecha de publicación: May 16 th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Barrera-Ramírez, R., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J. García-Cuevas, X., Sáenz-Reyes J. T. (2025). Site index for Pinus leiophylla Schiede ex Schltdl. & Cham., plantations in Michoacan, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1674. https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx
ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Artículo original

Índice de sitio para plantaciones de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., en Michoacán, México

Site index for *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., plantations in Michoacan, Mexico

Índice de sitio para *Pinus leiophyllal*

Site index for *Pinus leiophylla*

Barrera-Ramírez, R.[1] (0000-0002-0491-5721), Hernández-Ramos, J.[2] (0000-0003-2685-1199), Muñoz-Flores, H. J.[1*] (0000-0001-8815-7923), García-Cuevas, X.[3](0000-0002-2481-6704) Sáenz-Reyes J. T[1]. (0000-0001-9964-6407).

[1]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Uruapan. Avenida Latinoamericana 1101, Colonia Revolución, C.P. 60150, Uruapan, Michoacán, México.

[2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya a San Miguel de Allende Km 6.5 S/N. C.P. 38010, Celaya, Guanajuato, México.

[3]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Chetumal. Carretera Chetumal-Bacalar Km 25. C.P. 77963. Xul Ha, Othón P. Blanco, Quintana Roo, México.

Corresponding Author: Hipólito Jesús Muñoz-Flores. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Uruapan. Avenida Latinoamericana 1101, Colonia Revolución, C.P. 60150, Uruapan, Michoacán, México. Teléfono: (55) 3871 8700 ext. 84213. E-mail: jesusmuflores@yahoo.com.mx

ARTÍCULO EN PRENSA

RESUMEN

La simulación del crecimiento dinámico en plantaciones forestales (FP) es esencial. El objetivo fue ajustar un modelo de crecimiento en altura dominante y generar curvas de índice de sitio (*IS*) para plantaciones de pino. En plantaciones de *Pinus leiophylla* de cuatro a 24 años en Patamban, Michoacán, en 42 sitios de muestreo de 400 m^2, se obtuvo la altura dominante (*Ad*) y la edad de 126 árboles. Se ajustaron 11 modelos estadísticos para estimar la *Ad*. El mejor modelo se eligió a través de parámetros estadísticos utilizados típicamente en la modelación del crecimiento de *Ad* e índice de sitio (*IS*). Para generar las curvas anamórficas de *IS* se despejó el parámetro de la asíntota y la expresión se sustituyó en la ecuación integral a una edad base de 20 años. El turno de *Ad* fue a seis años en la intersección de ICA=IMA, donde las FP alcanzaron un incremento medio anual en *Ad* de 0.86, 1.21 y 1.56 m para los *IS* de 10, 14, y 18 m. El modelo de Schumacher describió con mayor precisión y confiabilidad la *Ad* y generó curvas de *IS* de tipo anamórfico que describen adecuadamente la variación muestral en FP de *P. leiophylla.*

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

PALABRAS CLAVE: incrementos, modelos matemáticos, Schumacher, calidad de estación turno.

ABSTRACT

Simulation of dynamic growth in forest plantations (FP) is essential. The objective was to fit a dominant height growth model and generate site index (*IS*) curves for pine plantations. In *Pinus leiophylla* plantations from 4 to 24 years old in Patamban, Michoacán state, in 42 sampling sites of 400 m^2, the dominant height (*Ad*) and the age of 126 trees were obtained. Eleven statistical models were fitted to estimate the *Ad*. The best model was chosen through statistical parameters typically used in modeling *Ad* and site index (*IS*) growth. The asymptote parameter was cleared to generate the anamorphic *IS* curves, and the expression was substituted in the integral equation at a base age of 20 years. The turn of *Ad* was six years at the intersection of ICA=IMA, where FP reached an average annual increase in *Ad* of 0.86, 1.21, and 1.56 m for *IS* of 10, 14, and 18 m. The Schumacher model described *Ad* more accurately and reliably and generated anamorphic *SI* curves that properly describe the sample variation in FP of *P. leiophylla*.

KEYWORDS: Increments, mathematical models, Schumacher, station quality, shift.

Introducción

Los ecosistemas forestales son dinámicos, por lo tanto, es esencial simular las características variables de los árboles y de las masas forestales con técnicas que faciliten su gestión (Nava-Nava *et al.,* 2020). Las diferencias de productividad dentro o entre especies y regiones son determinantes para aplicar distintos tratamientos silvícolas a una edad determinada, ya que esto repercutirá directamente en la rentabilidad financiera de los tratamientos y productos a obtener (Guerra-Hernández *et al.,* 2021).

El índice de sitio (*IS*) se ha utilizado ampliamente para evaluar la calidad de estación en rodales y plantación forestal (FP), donde se define como la altura dominante (*Ad*) a la dimisión que alcanza el rodal a una edad base (E_b) (Martínez-Zurimendi *et al.,* 2015; García-Cuevas *et al.,* 2022). Este indicador es el que mejor contribuye a determinar la productividad del sitio de manera eficiente, ya que la altura dominante, en teoría, no es afectada por la densidad del rodal o los tratamientos aplicados (Álvarez *et al.,* 2004; Fiandino *et al.,* 2020), y en donde el crecimiento en *Ad* del rodal sigue un patrón determinado y constante, así como de estar correlacionado con la producción de volumen ha^{-1} (García-Cuevas *et al.,* 2022).

En la mayoría de los trabajos forestales se han utilizado modelos de *IS* que describen la productividad a través de calidades de estación y etiquetas de *Ad* derivadas a partir de una curva guía previamente ajustada (Burkhart & Tomé, 2012). En este sentido, se pueden generar diferentes tendencias de crecimiento, ya sea de tipo anamórfico, donde los patrones en *Ad* son proporcionales entre sí en todas las clases; mientras que, las tendencias de tipo polimórfico señalan un crecimiento

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

diferenciado y dinámico en la *Ad* para todas las etiquetas de sitio (Zobel *et al.,* 2022). Aun cuando en la actualidad se aplican los modelos de efectos mixtos para mejorar las estimaciones de *Ad* en FP (García-Espinoza *et al.,* 2018; Hernández-Ramos *et al.,* 2022), no siempre se cuenta con la información requerida para aplicar este enfoque de mejora estadística y de aplicabilidad fuera del área de estudio a través de una calibración de los parámetros. Por ello, la metodología de la curva guía sigue teniendo resultados satisfactorios, ya que se ha aplicado en especies de coníferas como *Pinus oocarpa* Shiede (García-Cuevas *et al*., 2024), *Pinus pseudostrobus* var. *Oaxacana* (Ramírez *et al*., 2020) y *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. (Hernández-Ramos *et al*., 2015) en distintas regiones de México.

Pinus leiophylla Schiede ex Schltdl. & Cham es una especie con amplia distribución en México, ya que se ubica desde Chihuahua y hasta Oaxaca, entre altitudes de 1,600 a 3,000 m. s. n. m. (Perry, 1991). Además, es una especie de importancia maderable y no maderable (Martínez-Trinidad *et al.,* 2002) que ha tomado relevancia en el establecimiento de FP con el género *Pinus* en Michoacán, México, donde desde 2010 se registró una tendencia a incrementar el establecimiento con alrededor de 16,076 ha^{-1} (CONAFOR, 2020), lo cual representa una producción maderable de alrededor de 384,679 m^3 rollo anuales en el estado (CONAFOR, 2021).

En el oriente de la entidad se encuentra el 50 % de FP; sin embargo, no existen técnicas o metodologías silvícolas cuantitativas y actualizadas que se puedan implementar en la planeación, establecimiento, seguimiento y manejo de las FP, lo que representa un problema en esta región. Por lo tanto, el objetivo fue ajustar un modelo de crecimiento en altura dominante (*Ad*) y generar curvas de índice de sitio (*IS*) para plantaciones de *Pinus leiophylla* establecidas en la Sierra Purhépecha de Michoacán, México.

Material y Métodos

El estudio se realizó en FP de *Pinus leiophylla* establecidas entre los 2,000 y 2,600 m de altitud en la Comunidad Indígena (IC) de Patamban, perteneciente al municipio de Tangancícuaro, Michoacán, México (Figura 1). La IC se ubica en la región fisiográfica Eje Neovolcánico Transversal, en la Sierra Purhépecha; cuenta con una superficie forestal de 11, 232 ha^{-1} y está caracterizada por un ecosistema de bosque templado subhúmedo (Cw1) con lluvias en verano, temperatura media anual de 12° C, mínima de -2 °C y máxima de 22 °C, precipitación media anual de 1,850 mm; los suelos son de origen volcánico y corresponde a Andosol ócrico (80 %), Litosol y Cambisol crómico (20 %) (INEGI, 2024).

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

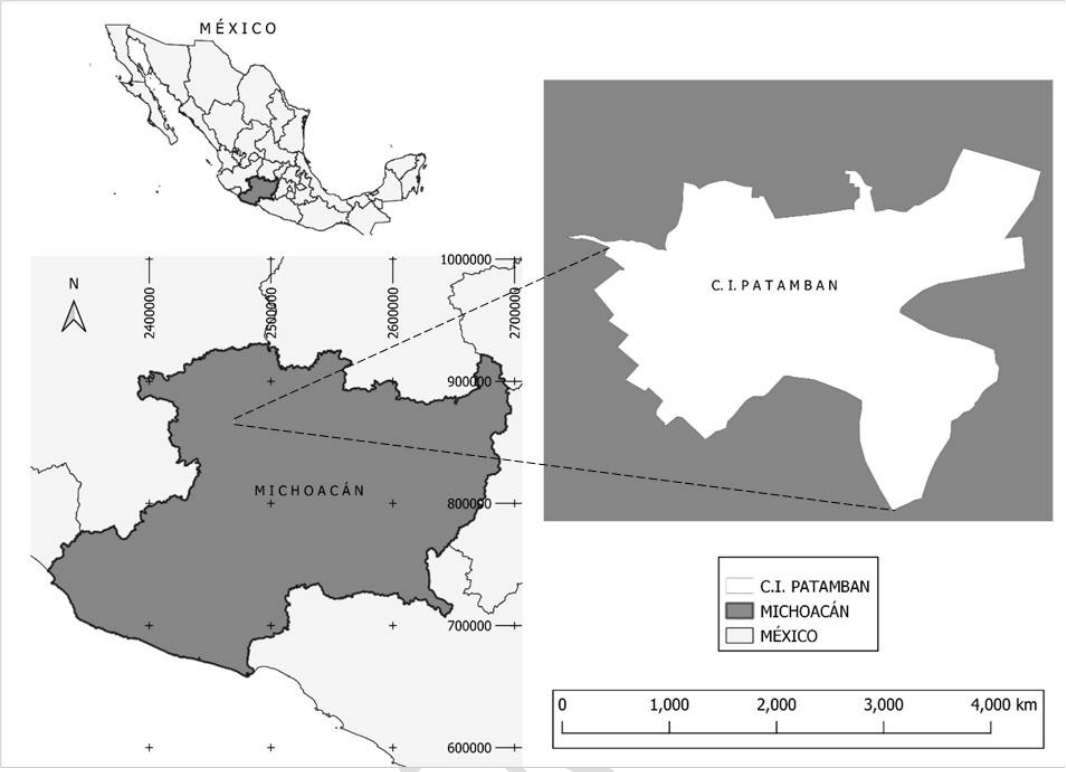


Figura 1. Ubicación geográfica del área donde se encuentran las plantaciones forestales (FP) de *Pinus leiophylla* de la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

En cada uno de los 42 sitios de muestreo cuadriculares de 400 m^2 establecidos en FP con edad de cuatro a 24 años, se seleccionaron tres árboles dominantes en altura y dentro del sitio de muestreo (CONAFOR, 2014; 126 individuos), los cuales fueron medidos con un Hipsómetro láser Forestry PRO II Nikon®, mientras que, la edad se determinó con núcleos obtenidos con el taladro de Pressler en donde se contaron los anillos anuales de crecimiento (Buendía Rodríguez *et al.,* 2022) y se contrastó el dato con los registros de las plantaciones de la IC. Con esta información se determinaron los estadísticos descriptivos, el coeficiente de asimetría (CS) y la curtosis para verificar la adecuada distribución de los datos, donde ambos indicadores deberán de estar entre 3 y -3 desviaciones estándar (Martínez *et al*., 2014).

De la literatura especializada se tomaron 11 modelos (Tabla 1) para el ajuste de los datos de la *Ad* (Martínez-Zurimendi *et al*., 2015; Senilliani *et al*., 2021; García-Cuevas *et al*., 2022; Hernández-Ramos *et al*., 2022).

ARTÍCULO

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Tabla 1. Modelos de crecimiento para estimar altura dominante de plantaciones forestales (FP) de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

Modelo	Expresión	Identificador de la ecuación
Von Bertalanffy	$Ad = a_0[1 - e^{-a_1 E}]^3$	[1]
Chapman-Richards	$Ad = a_0[1 - e^{-a_1 E}]^{a_3}$	[2]
Monomolecular	$Ad = a_0[1 - a_1 e^{-a_2 E}]$	[3]
Gompertz	$Ad = a_{0(}e^{-a_1} e^{-(a_2 E)})$	[4]
Hossfeld IV	$Ad = E^{a_2}/a_1 + E^{a_2/a_0}$	[5]
Levakovic III	$Ad = a_0(E^2/(a_1 + E^2))^{a_2}$	[6]
Cieszewski y Bella	$Ad = a_0/(1 - a_1 E^{a_2})$	[7]
Schumacher	$Ad = a_0 e^{-a_1/E}$	[8]
Verhulst-Logistica	$Ad = a_0/(1 - e^{a_1 - a_2 E})$	[9]
Alometrica	$Ad = a_0 E^{a_1}$	[10]
Korf	$Ad = e^{a_0 - (a_1/E^{a_2})}$	[11]

Donde: *Ad*: altura dominante (m), a_i: parámetros a ser ajustados y *E*: edad (años).

Los modelos de crecimiento fueron ajustados con el paquete estadístico R® a través de la función *nls* y la técnica de máxima verosimilitud (R Core Team, 2020). La selección del mejor modelo en términos de precisión, se hizo a partir de la significancia del valor de los parámetros (α=*0.05*), los valores del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}, [12]), la raíz del cuadrado medio del error (*RMSE*, [13]), criterio de información de Akaike (1974) y Bayesiano (AIC [14] y BIC [15]), del Sesgo [16] (Martínez-Zurimendi *et al*., 2015; García-Cuevas *et al*., 2022) y del rango relativo promedio de cada uno de los modelos (RRP, [17]) (Poudel & Cao, 2013). De igual manera, se consideró la parsimonia de las expresiones empleadas.

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1)\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)\sum_{i=1}^{n}(y_i - \acute{y}_i)^2} \quad [12]$$

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad [13]$$

$$AIC = 2 \cdot p + n \cdot ln\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}\right) \quad [14]$$

$$BIC = n \cdot l\,n\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}\right) + p \cdot ln(n) \quad [15]$$

$$Sesgo = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n}\right) \quad [16]$$

$$RRP = 1 + \frac{(m-1)\cdot(S_i - S_{min})}{S_{max} - S_{min}} \quad [17]$$

Donde, $\boldsymbol{y_i}$, $\boldsymbol{\hat{y}_i}$ y $\boldsymbol{\bar{y}_i}$ son los valores observados, estimados y promedio, respectivamente; $\boldsymbol{n}$ es el número total de datos utilizados en el ajuste de los modelos; $\boldsymbol{p}$ se refiere al número de

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

parámetros de los modelos y *m* el número de modelos evaluados (Tabla 1); S_i estadístico de bondad de ajuste seleccionado; y S_{max}.y S_{min} son los valores mínimos y máximos del S_i, respectivamente.

Una vez seleccionado el mejor modelo, al verificar la tendencia de las estimaciones *versus* la distribución de los datos observados, así como el valor promedio del *RRP* de cada uno de los estadísticos de ajuste (R^2_{adj}, *RMSE*, AIC, BIC y Sesgo; Poudel & Cao, 2013), se corroboró el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos (Martínez *et al*., 2014).

Con el modelo de crecimiento elegido se procedió a determinar la curva guía en altura dominante, al considerar que, cuando la Edad (E) se hace igual a la Edad base (E_b), entonces la *Ad* es igual al *IS* (García *et al*., 2021). Para generar las curvas anamórficas, de las ecuaciones de *IS* se despejó el parámetro de la asíntota y la expresión se sustituyó en la ecuación base, con lo que el parámetro asintótico se considera implícito y los parámetros de forma fueron comunes para todos los sitios (Clutter *et al*., 1983; García *et al*., 2021); mientras que, al variar la E y las clases de *IS* y mantener constante la E_b, se generaron las curvas anamórficas.

Para generar las curvas polimórficas, de las ecuaciones de *IS* se despejó alguno de los parámetros de los exponentes relacionados a la condición de sitio y se sustituyó en la ecuación base (García *et al*., 2021); igualmente, al variar la E y las clases de *IS* para mantener constante la E_b, se generan las curvas polimórficas (Clutter *et al*., 1983; García *et al*., 2021). En la construcción de las curvas de *IS* se utilizó una E_b de 20 años.

Por ejemplo, para el modelo de Schumacher en el caso de a_0 corresponde $Ad = \left[\frac{IS}{e^{-a_1/E_b}}\right] \cdot e^{-a_1/E}$ [8.1] para la forma anamórfica, y en a_1 la forma de la expresión que representa la dendencia de crecimiento es $Ad = a_0 \cdot e^{-\frac{-\ln\left(IS/a_0\right)\cdot E_b}{E}}$ [8.2] para las polimórficas, donde las clases de índice de sitio (*IS*) fueron definidas a través de la distribución de la información en la E_b establecida a los 20 años.

Se determinaron los turnos técnicos (*tt*) para cada curva generada y así identificar el punto de culminación de la máxima velocidad de crecimiento y el punto de intersección donde el incremento corriente anual es igual al incremento medio anual (ICA=IMA) (Kiviste *et al*., 2002; Hernández-Ramos *et al*., 2022), lo cual puede ser utilizado determinar la edad para la aplicación de tratamientos silvícolas en las FP.

Resultados y discusión

La estadística descriptiva de la *Ad* y *E* de los árboles dominantes de *Pinus leiophylla* no indicó problemas de distribución, ya que el coeficiente de asimetría y la curtosis presentaron valores menores a 1.1, con un promedio de edad de 10 años y una *Ad* de nueve metros (Tabla 2).

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx
ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables de la muestra empleada de plantaciones forestales de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

Estadístico	Edad (años)	Altura dominante (m)
Media	10.00	9.00
Mínimo	4.00	3.00
Máximo	24.00	20.00
Error típico	0.52	0.32
Desviación estándar	5.85	3.66
Varianza de la muestra	34.21	13.40
Curtosis	0.12	0.14
Coeficiente de asimetría	1.05	0.50

Los 11 modelos de crecimiento ajustados presentaron parámetros significativos en todos los casos ($\alpha < 0.05$) y valores en la asíntota que señalan alturas dominantes máximas de entre 13.0 m (Von Bertalanffy [1]) y 17.5 m (Schumacher) (Tabla 3).

Tabla 3. Valor de los parámetros, estadísticos y significancia de los parámetros de los modelos de crecimiento ajustados para altura dominante de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t	Pr>|t|
1	a_0	13.012	0.368	35.370	<0.001
	a_1	0.265	0.011	23.070	<0.001
2	a_0	13.926	0.624	22.313	<0.001
	a_1	0.175	0.031	5.595	<0.001
	a_2	1.715	0.328	5.232	<0.001
3	a_0	14.258	0.703	20.280	<0.001
	a_1	1.227	0.107	11.431	<0.001
	a_2	0.141	0.022	6.427	<0.001
4	a_0	13.653	0.490	27.838	<0.001
	a_1	2.805	0.357	7.849	<0.001
	a_2	0.222	0.025	8.772	<0.001
5	a_0	15.343	1.101	13.933	<0.001
	a_1	1.835	0.666	2.757	0.007
	a_2	1.722	0.223	7.711	<0.001
6	a_0	14.964	0.709	21.101	<0.001
	a_1	76.019	34.932	2.176	0.032
	a_2	0.712	0.162	4.396	<0.001
7	a_0	15.343	1.101	13.933	<0.001
	a_1	28.153	8.761	3.213	0.002

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

	a_2	-1.722	0.223	-7.711	<0.001
8	a_0	17.484	0.637	27.440	<0.001
	a_1	5.630	0.342	16.480	<0.001
9	a_0	13.341	0.405	32.940	<0.001
	a_1	2.002	0.192	10.420	<0.001
	a_2	0.317	0.031	10.080	<0.001
10	a_0	2.413	0.221	10.940	<0.001
	a_1	0.578	0.036	16.150	<0.001
11	a_0	2.866	0.123	23.237	<0.001
	a_1	5.578	1.255	4.447	<0.001
	a_2	0.992	0.195	5.078	<0.001

Al evaluar de manera conjunta los estadísticos de bondad de ajuste de los modelos de crecimiento ajustados, se observó que, de acuerdo los valores en los criterios de ajuste, la expresión de Verhulst-Logistica [9] es la mejor, seguida en orden por la de Schumacher (Tabla 4, [8]). Sin embargo, la expresión de Schumacher es la que guarda una mejor parsimonia y el RRP resulto de manera penalizada el de menor valor por lo cual esta última fue la seleccionada como la adecuada para describir la tendencia de altura dominante en la especie.

Tabla 4. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos de crecimiento empleados para altura dominante de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

ID	Coeficiente de determinación (R^2)	Raíz del cuadrado medio del error (RMSE)	Criterio de información de Akaike (AIC)	Criterio de información de Bayesiano (BIC)	Sesgo (m)	Rango relativo promedio (RRP)
1	0.7502	1.8377	506.8	515.3	0.0988	11485.43
2	0.7669	1.7824	500.2	511.5	0.0035	11393.85
3	0.7657	1.7870	500.8	512.1	0.0000	11408.75
4	0.7683	1.7770	499.4	510.7	0.0024	11376.47
5	0.7657	1.7871	500.8	512.1	0.0051	11408.95
6	0.7664	1.7845	500.5	511.8	0.0021	11400.68
7	0.7657	1.7871	500.8	512.1	0.0051	11408.95
8	0.7637	1.7873	499.9	508.4	0.0034	11325.21
9	0.7700	1.7708	498.6	509.9	0.0030	11356.27
10	0.7088	1.9840	525.8	534.2	-0.0472	11927.69
11	0.7637	1.7946	501.9	513.2	0.0029	11433.19

En la Figura 2, se observa la tendencia de las predicciones donde la expresión de Von Bertalanfy [1] sobreestima la *Ad* a edades temprana y subestima a mayor edad, a diferencia de la expresión alométrica [10] que solo se ajusta a ciertas edades y en otras, o bien sobreestima o subestima. También, se observa, que las expresiones de Verhulst-Logística [9] y Schumacher [8] son

ARTÍCULO EN PRENSA

http://revistabiociencias.uan.edu.mx
ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

prácticamente iguales y, además, son las que mejor tendencia presentaron con respecto a los datos observados (Figura 2).

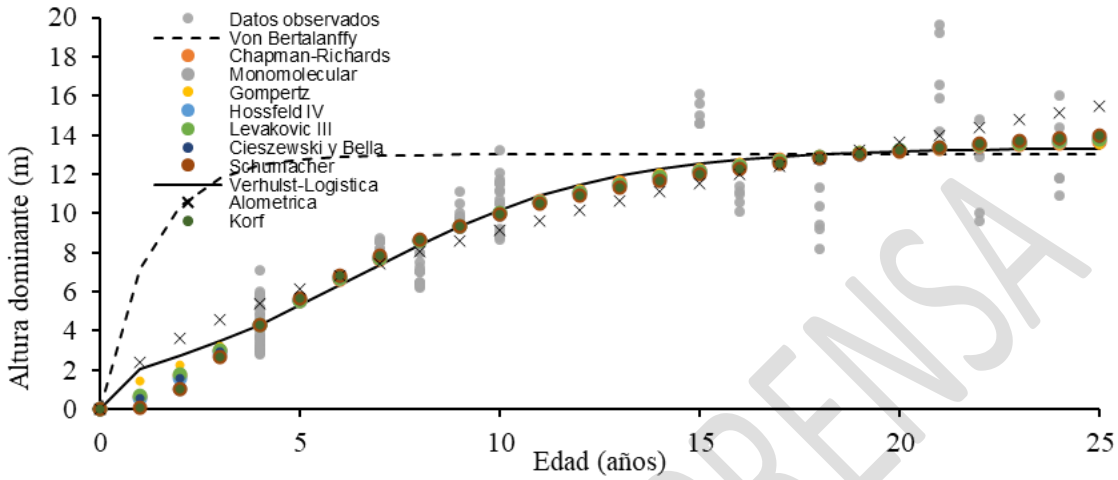


Figura 2. Distribución y tendencia estimada por modelo de crecimiento de altura dominante (*Ad*, m) en plantaciones forestales de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán.

Se contrastó la tendencia de las estimaciones con cada uno de ellos y la distribución de la información empleada en donde los modelos de Von Bertalanffy [1] y Alométrico [10] fueron los que presentaron los sesgos más evidentes en la estimación promedio de la *Ad* en función de la E de las FP (Tabla 4 y Figura 3).

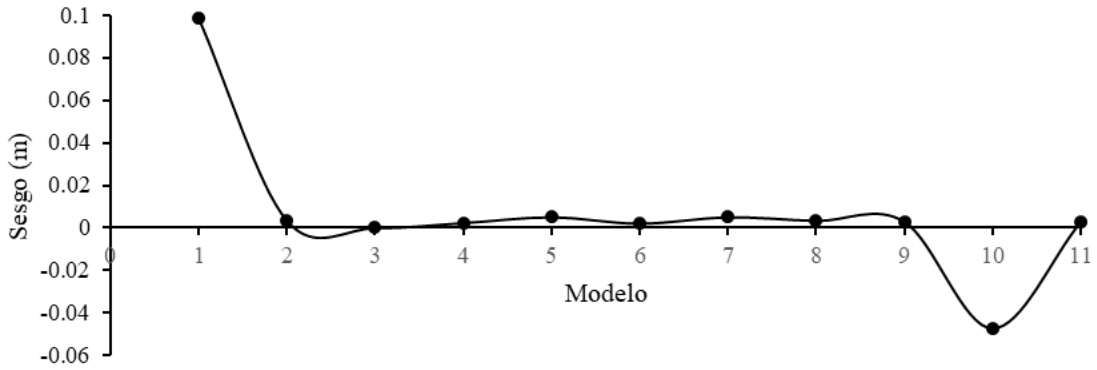
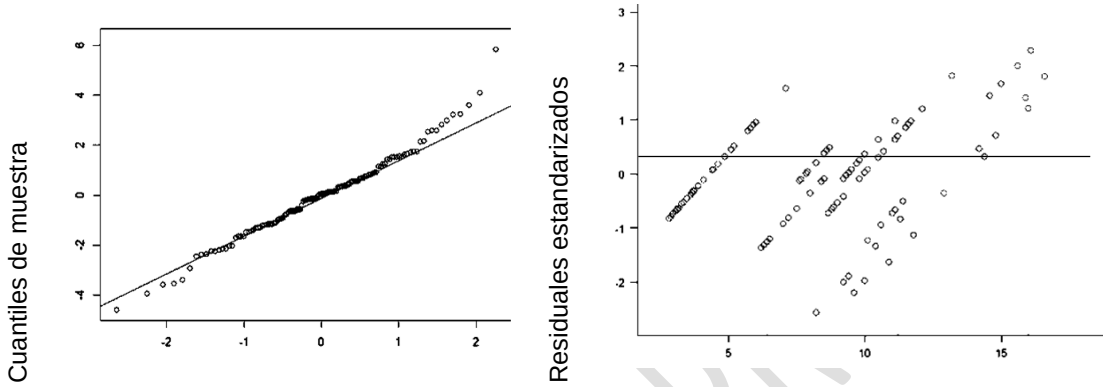


Figura 3. Sesgos de las predicciones de los modelos de crecimiento de altura dominante (*Ad*, m) en plantaciones de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán.

"EN PRENSA"

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Al verificar de forma gráfica los supuestos de regresión de normalidad en la distribución de los residuales (Figura 4a) y homocedasticidad de la varianza (Figura 4b), no se observó en ninguno de los dos casos algún problema de distribución global, lo cual se ratifica con la prueba de Shapiro-Wilk. En el primer caso, aun cuando en los extremos se observó una ligera desviación se obtuvo una tendencia hacia la línea recta en los cuartiles teóricos *versus* la muestra, mientras que, los residuos estandarizados presentan tendencia a cero (<3).



a) *Q-Q* plot: W = 0.9773, *p*-valor = 0.0345

b) Distribución de residuales.

Figura 4. Pruebas de normalidad (a) y homocedasticidad de la varianza (b) del modelo de Schumacher seleccionado como el mejor.

Una vez definida la ecuación de mejor ajuste, se creó una curva genérica de *Ad* con la siguiente expresión: $Ad = 17.484e^{-5.630/E}$ [8]. A partir de la ecuación de *Ad*, mediante manipulación algebraica se generó la estructura de las expresiones para generar las curvas anamórficas con las clases de *IS* de 10, 14, y 18 m. En el caso de las curvas de tipo polimórficas no se apegaron a la tendencia de la información.

Curvas anamórficas: $$Ad = ISe^{5.630(1/E_b - 1/E)} \quad [8.1]$$

Curvas polimórficas: $$Ad = 17.484\left(\frac{IS}{17.484}\right)^{\left(\frac{E_b}{E}\right)} \quad [8.2]$$

Como se puede observar en la figura 5a, las curvas anamórficas cubren todo el intervalo de dispersión de los datos observados de la *Ad* en individuos de *Pinus leiophylla* establecidos en FP. Mientras que, las curvas polimórficas sobreestiman o subestiman la altura dominante en edades menores y en calidades de estación más pobres y en las mayores, además, se debe de modificar las etiquetas de *IS* para que no sobrepase la asíntota natural del modelo (Figura 5c). El turno para la altura dominante para esta especie se determinó aproximadamente a los seis años, en el punto de intersección de ICA=IMA, las FP alcanzaron un incremento medio por año en *Ad* de 0.86, 1.21 y 1.56 m para los índices de sitio de 10, 14 y 18 m (Figura 5a), respectivamente, donde el mayor

http://revistabiociencias.uan.edu.mx
ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

incremento corriente fue a los cuatro años con incrementos de 1.21, 1.70 y 2.19 m (Figura 5b). Los incrementos relacionados con la tendencia de crecimiento polimórfico, no se apegaron a las tendencias lógicas de las especies vegetales, por lo cual se descartaron (Figura 5d).

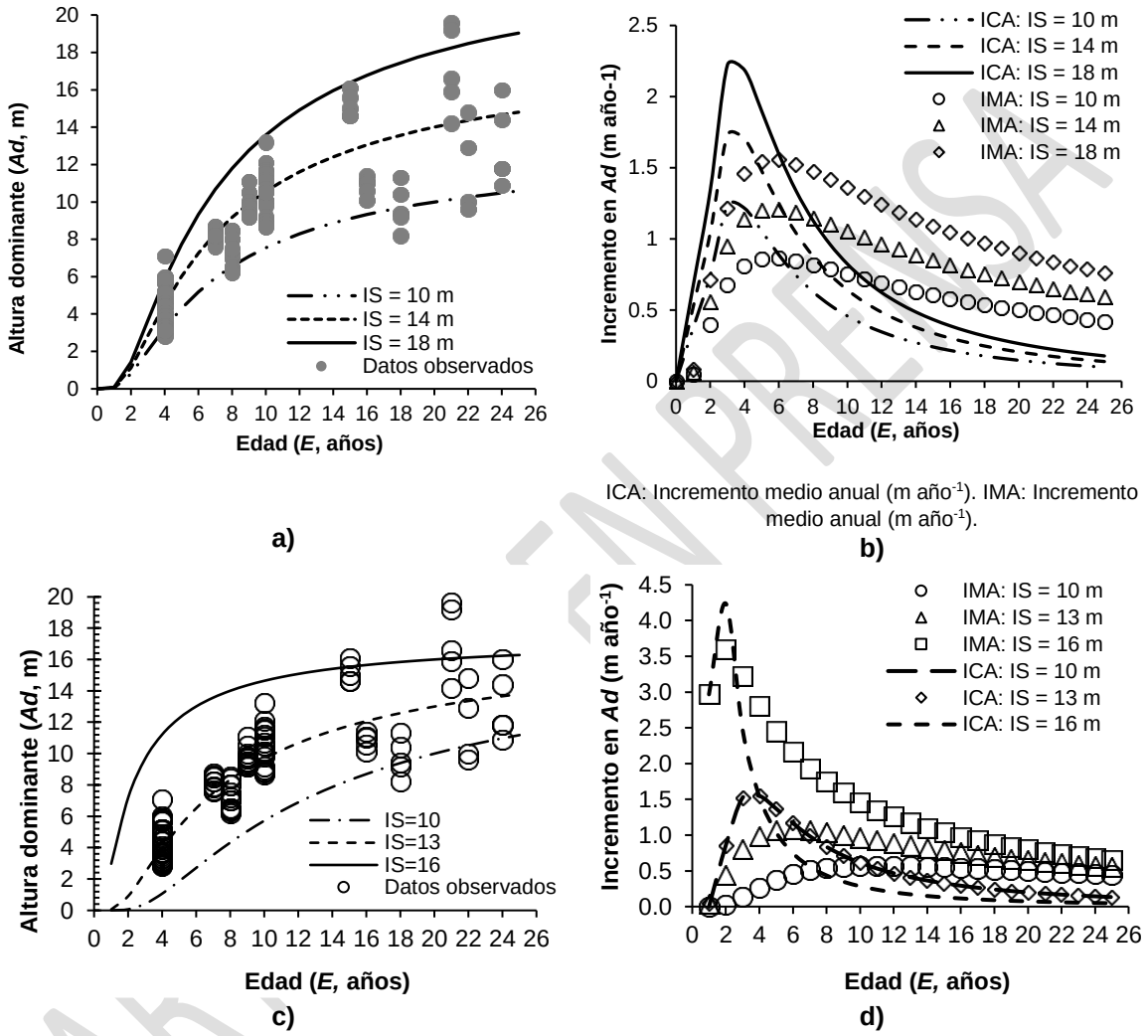


Figura 5. Crecimiento en altura dominante de tipo anamórfica (a) y polimórfica (c) e incrementos (c y d) por clases de índice de sitio (*IS*) para plantaciones de *Pinus leiophylla* en la Comunidad Indígena de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán, México.

La clasificación de zonas forestales de acuerdo con su productividad es fundamental para la planeación de las actividades silvícolas (Díaz *et al*., 2018; Senilliani *et al*., 2021; García-Cuevas *et al*., 2022). Para ello, la determinación de la calidad de estación a través de las etiquetas de *IS* y la curva guía como referencia es la técnica más empleada para establecer niveles de productividad en áreas forestales (Martínez-Zurimendi *et al*., 2015; García *et al*., 2021; García-Cuevas *et al.*, 2024).

http://revistabiociencias.uan.edu.mx ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Para lo cual es importante definir la ecuación que describa mejor el comportamiento del crecimiento en *Ad*, puesto que, al integrarse en un sistema de crecimiento y rendimiento permite predecir los volúmenes de producción y la edad óptima de cosecha de la plantación (Nava-Nava *et al*., 2020).

La tendencia de crecimiento de tipo anamórfica en la *Ad* como resultado de este trabajo de investigación concuerda con lo reportado por Castillo *et al.* (2013) para rodales de *Pinus leiophylla* en la región forestal de Santiago Papasquiaro, Durango, México a una edad base de 50 años, sin embargo, estos autores describen la dinámica de bosques de esta especie. Benavides (1991), determinó a través de *IS* que en rodales naturales de *Pinus leiophylla* en la Sierra de Tapalpa, Jalisco, a la edad base de 45 años se presentan los mayores crecimientos en *Ad* en comparación con *Pinus michoacana*, *Pinus oocarpa* y *Pinus lumholtzii;* y que al igual que en este trabajo, las curvas anamórficas presentaron la mejor predicción y ajuste con el modelo de Schumacher, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.94. Es importante resaltar que las diferencias entre el crecimiento que arrojan los estudios son debido a los hábitos de las especies, la calidad de estación del lugar o al manejo diferenciado que se le da a las plantaciones o rodales naturales.

En el estado de Michoacán para *Pinus leiophylla* se han reportado áreas con potencial para establecer plantaciones (CONABIO, 2019) con un turno técnico de 12 años en suelos de tipo Andosol (García & Muñoz, 1993). Sin embargo, no existe más información para la región de la Sierra Purépecha de Michoacán que pueda contribuir a la planeación y gestión de las plantaciones forestales de esta especie con importancia económica.

En un trabajo similar con *Pinus oocarpa* en Michoacán, García-Cuevas *et al*. (2024) señalan que el punto de intersección de ICA e IMA (turno técnico en altura dominante) sucedió a la misma edad que este trabajo (9 años), además, la representación a través de curvas anamórficas para todas las calidades de estación evaluadas, y a diferentes edades con las curvas polimórficas (5, 8, 11 y 15 años) señala que los puntos de inflexión están asociados con las zonas de mejores calidades de estación. Al igual que sucede en este trabajo, con la culminación del incremento alrededor de los 3, 6 y 11 años.

En plantaciones con *Pinus patula* var. longipedunculata establecidas en Oaxaca, se modeló el *IS* y como resultado se generaron curvas polimórficas, ya que, al igual que en este estudio, al sobreponer los datos observados y los predichos, estos últimos sobreestimaron la altura dominante proyectada (Nava-Nava *et al*., 2020). Sin embargo, aunque los resultados de los parámetros del modelo son significativos, el coeficiente de determinación fue bajo (0.58) en comparación con el que se obtuvo para *Pinus leiophylla* (0.76). Conocer el *IS* permite saber a qué edad los árboles alcanzarán altura determinada y que producción se pueden esperar en función de la edad (Ramírez *et al*., 2020); por lo tanto, la elección del lugar y condición para establecer una plantación forestal de cualquier especie será concluyente al momento de determinar su rendimiento maderable y el tipo de manejo. En este sentido, las condiciones particulares que propicia el sitio son fundamentales para el crecimiento, incremento medio y corriente anual de las especies (Pompa-García & Domínguez-Calleros, 2015; García-Aguilar *et al*., 2017; Hernández-Ramos *et al*., 2022).

ARTÍCULO EN PRENSA

ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

La ecuación propuesta para modelar la calidad de estación de las plantaciones y sus respectivas etiquetas de *IS* puede ser incluidos a un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para que puedan ser la base de una gestión forestal fundamentado en clasificar áreas forestales de acuerdo con su productividad maderable apegadas a las condiciones particulares de crecimiento (Castillo-López *et al*., 2018, Hernández-Ramos *et al*. 2022). Por lo tanto, las distintas tendencias de crecimiento en *Ad*, las clases de *IS* y los incrementos obtenidos pueden ser empleados en la toma de decisiones para el manejo forestal de las FP de *Pinus leiophylla*, o como una herramienta para clasificar áreas forestales de acuerdo con su productividad maderable en la IC. de Patamban, Michoacán o también para definir los turnos de corta en este tipo de cultivo forestal (García- Espinoza *et al*., 2018; Hernández-Ramos *et al*. 2022).

Conclusiones

El ajuste del modelo de Schumacher [8] permitió describir con mayor precisión y confiabilidad la altura dominante y generar curvas anamórficas de índice de sitio que describen adecuadamente la variación muestral de la altura dominante en plantaciones forestales de *Pinus leiophylla*, con las que es posible clasificar las plantaciones forestales de acuerdo con el nivel de productividad del sitio.

Las expresiones propuestas podrán ser incluidas dentro de un sistema de crecimiento y rendimiento con una precisión aceptable. Las ecuaciones de altura dominante generadas describen la dispersión de los datos observados, cumplen con las características deseables de un modelo de predicción, como son, comportamiento sigmoide, presentan un punto de inflexión, asíntota horizontal y las tres clases de índice presentan culminación del crecimiento.

El turno técnico en altura dominante para las curvas anamórficas ocurre aproximadamente a los seis años para las etiquetas de índice de sitio de 10, 14 y 18 metros.

Contribución de los autores

“Conceptualización y desarrollo del trabajo, autor 1 y 2; desarrollo de la metodología, autor 1 y 2; manejo de software, autor 2; revisión y validación experimental, autor 2 y 4; análisis de resultados, autor 1y 2; Manejo de datos, autor 1, 2 y 3; escritura y preparación del manuscrito, todos los autores; revisión y edición, todos los autores. “Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.” Para nombrar a los participantes, deberán usarse siglas de su nombre. La autoría debe limitarse a aquellos que hayan contribuido sustancialmente al trabajo informado.

Financiamiento

"Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias a través del proyecto fiscal: 12202035967”

ARTÍCULO EN PRENSA

Agradecimientos

A las autoridades comunales de la IC. de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán por las facilidades prestadas para la realización de esta investigación. Y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias por financiamiento del proyecto: 12202035967.

Conflicto de interés

"Los autores declaran no tener conflicto de interés".

Referencias

Álvarez, G. J. G., Barrio, M. A., Diéguez, U. A., & Rojo, A. A. (2004). Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencia Forestales,* 18,303-309. https://www.researchgate.net/publication/40836590_Metodologia_para_la_construccion_de_curvas_de_calidad_de_estacion

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-1694-0_16

Benavides, S. J. D. (1991). Índices de sitio para estimar la calidad de sitio en bosques de coníferas. *Ciencia Forestal en México*, 16 (69), 3-31.

Buendía, R.E., Pineda, T. O., Flores, E., Guerra de la Cruz, V., Islas, F., Acosta, M., & Carrillo, A. (2022). Método no destructivo para estimar volumen, biomasa y carbono en arboles individuales: estudio de caso, *Juniperus deppeana* Steud. INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Valle de México. Folleto Técnico N°. 02. Texcoco, México. 40 p.

Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). Modeling Forest trees and stands. *Springer*, Dordrecht, Netherlands. 458 p. https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-3170-9

Castillo, L. A., Vargas, L. B., Corral, R. J. J., Nájera, J. A. L., Cruz, C. 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), 86-103. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/391

Castillo-López, A., Santiago-García, W., Vargas-Larreta, B., Quiñonez-Barraza, G., Solís-Moreno, R., & Corral-Rivas, J., (2018). Modelos dinámicos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 1-25. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.185

Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2019). La biodiversidad en Michoacán: Estudio del estado 2, Vol. II. CONABIO. Cd. México, México. 223 p.

Clutter, J. L., Fortson, J. C., Piennar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). Timber Management Quantitative Approach. Wiley. New York, USA. 333 p. https://archive.org/details/timbermanagement0000unse/page/n9/mode/2up

ARTÍCULO EN PRENSA

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2014). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo. Guadalajara, Jal., México: CONAFOR. 165 p.

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2020). El sector forestal mexicano en cifras 2020. Bosques para el bienestar social y climático. Zapopan, Jalisco, México. 100 p. http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7749El%20Sector%20Forestal%20Mexicano%20en%20Cifras%202019.pdf

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2021). Anuario estadístico de la producción forestal 2018. Semarnat-Conafor. Ciudad de México, México. 297 p. https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales

Díaz, V. M. A., Rodríguez, O. G., Leyva, L. J. C., & Enríquez, V. J. R. (2018). Estimación del índice de sitio para *Pinus cooperi* en el ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 5(1), 34-42. https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/issue/view/16

Fiandino, S., Plevich, J., Tarico, J., Utello, M., Demaestri, M., & Gyenge, J. (2020). Modeling Forest site productivity using climate data and topographic imagery in *Pinus elliottii* plantations of central Argentina. *Annals of Forest Science*, 77(4), 95. https://doi.org/10.1007/s13595-020-01006-3

García-Aguilar, J. A., Velasco-Velasco, V. A., Rodríguez-Ortiz, G., & Enríquez-del Valle, J. R. (2017). Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 2-23. https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.108

García, M. J. J., & Muñoz, F. H. J. (1993). Guía Técnica para el establecimiento y manejo de plantaciones en la Cuenca del Lago de Pátzcuaro. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacifico Centro. Guía Técnica No. 2. Morelia, Michoacán, México. 22 p.

García, C. X., Toledo, C. C., Hernández, R. J., Mendoza, M. A., & Hernández, R. A. (2021). Índice de sitio para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 12 (64),92-114. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.793

García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, J., Tamarit-Urias, J. C., Hernández-Ramos, A., & Quiñonez-Barraza, G. (2022). Modelos de índice de sitio en plantaciones de *Swietenia macrophylla* King en Quintana roo, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(3), 387-387. https://doi.org/10.35196/rfm.2022.3.387

García-Cuevas, X., Rodríguez-Medina, R. E., Hernández-Ramos, J., Ruiz-Duque, H., Hernández-Ramos, A., & Sáenz-Reyes, J. T. (2024). Índice de sitio en plantaciones forestales de *Pinus oocarpa* Shiede en Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11(1), e3765. https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3765

García-Espinoza, G. G., Aguirre-Calderón, O. A., Quiñonez-Barraza, G., Alanís-Rodríguez, E., González-Tagle, M. A., & García-Magaña, J. J. (2018). Global-local and fixed-random parameters to model dominant height growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(1), 141-156. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.047

ARTÍCULO EN PRENSA

Guerra-Hernández, J., Arellano-Pérez, S., González-Ferreiro, E., Pascual, A., Altelarrea, V. S., Ruiz-González, A. D., & Álvarez-González, J. G. (2021). Developing a site index model for *P. pinaster* stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and environmental data. *Forest Ecology and Management*, 481, 118690. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118690

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. https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.278

Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., Ordaz-Ruiz, G., García-Espinoza, G. G., García-Magaña, J. J., & García-Cuevas, X. (2022). Índice de sitio para plantaciones forestales de *Pinus patula* en el Estado de México. *Madera y bosques*, 28(2). https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822308

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). Conjunto de datos vectoriales carta de uso de suelo y vegetación serie VI. Escala 1:250 000, 1ra edición. https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas

Kiviste, A., Álvarez, G. J. G., Rojo, A. A., & Ruiz, G. A. D. (2002). Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimenticia. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid, España. 190 p. https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/21328

Martínez, G. M. A., Sánchez, V. A., Toledo, A. E. A., & Faulin, F. J. (2014). Bioestadística amigable. 3ª Edición. *Elsevier España*, S. L. Barcelona, España. 596 p. https://es.slideshare.net/slideshow/bioestadistica-amigable-3a-edicionpdf/251830211

Martínez-Trinidad, T., Vargas-Hernández, J. J., Muñoz-Orozco, A., & López-Upton, J. (2002). Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia,* 29(3),365-376. https://www.redalyc.org/pdf/573/57320308.pdf

Martínez, Z.P.M., Domínguez, D.A., Juárez, G.L.M., López, L.V., De la Cruz, A., & Álvarez M. (2015). Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana,* 38(4), 415-425. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802015000400010&script=sci_arttext

Nava-Nava, A., Santiago-García, W., Rodríguez-Ortiz, G., Santos-Posadas, H. M., Ruiz-Aquino, F., Santiago-García, E., & Suárez-Mota, M. E. (2020). Ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4), 461-470. https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.470

Perry, J. P. (1991). The Pines of Mexico and Central America. Timber Press, Portland, Oregon, USA. 231 p.

Pompa-García, M., & Domínguez-Calleros, P. A. (2015). Respuesta de madera temprana y tardía a la sequía en una conífera mexicana bajo dos condiciones ecológicas. *Ecosistemas*, 24(2), 37-42. https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-2.06

Poudel, K. P., & Cao, Q. V. (2013). Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. *Forest Science,* 59: 243-252. https://doi.org/10.5849/forsci.12-001

ARTÍCULO EN PRENSA

ISSN 2007-3380
https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1674

Ramírez, H. L., Marroquín-Morales, P., Reyes-Reyes, J., & Rodríguez-Morales, J. A. (2020). Índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana*, en Siltepec, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 24(3), 13-18. https://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/agropecuaria/article/view/202

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/

Senilliani, M. G., Bruno, C., & Brassiolo, M. (2021). Dominant height curves and site index in *Prosopis alba* plantations. *Agriscientia* 38 (2), 13-25. https://doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n2.30940

Zobel, J. M., Schubert, M. R., & Granger, J. J. (2022). Shortleaf Pine (*Pinus echinata*) Site Index Equation for the Cumberland Plateau, USA. *Forest Science*, 68(3), 259-269. https://doi.org/10.1093/forsci/fxac011

ARTÍCULO EN PRENSA