



Artículo / Article

Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo

Site index for *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. natural stands in *Hidalgo* state

Jonathan Hernández-Ramos¹, J. Jesús García-Magaña², Xavier García-Cuevas¹,
Adrián Hernández-Ramos³, H. Jesús Muñoz-Flores⁴ y Manuel Samperio-Jiménez⁵

Resumen

La estimación de la productividad de los sitios forestales es indispensable para el manejo sostenible de los bosques y el índice de sitio constituye la metodología más utilizada en el mundo para este fin. Sin embargo, uno de los problemas más graves en el manejo forestal es la falta de ordenamiento de los rodales en función a su productividad, lo que propicia sobreexplotación de los recursos en algunos casos y la subexplotación en otros. Por ello, el objetivo del presente estudio fue estimar el índice de sitio y comparar la factibilidad de emplear las curvas anamórficas y polimórficas para bosques naturales de *Pinus teocote* en la región oriente del estado de Hidalgo. Se manejaron 345 pares de valores edad-altura de árboles dominantes y codominantes evaluados en rodales puros de este taxon; se ajustó el modelo de crecimiento de Schumacher que de acuerdo al bajo valor del Cuadrado Medio del Error, el alto valor de Pseudo R^2 ajustada y la correcta distribución de residuales mostró un ajuste adecuado a los datos, para determinar la curva guía y la construcción de las familias de curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio. Se establecieron calidades de estación de I, II, III, IV y V, en los valores de 27, 23, 19, 15 y 11 m, respectivamente, a una edad base de 50 años.

Palabras clave: Altura dominante, calidad de estación, curvas anamórficas, curvas polimórficas, modelo de crecimiento, modelo de Schumacher.

Abstract

Site productivity estimation is essential for forest management. Site Index is a measure of productivity and also it is a widely employed methodology in the world. However, one of the most serious problems in forest management is the lack of planning of stands according to their productivity, causing overharvest or subharvest in some cases. The aim of this study was to estimate site index and to evaluate the feasibility of employment of polymorphic or anamorphic curves for natural stands of *Pinus teocote* in eastern *Hidalgo* state. There were used 345 height-age pair values of dominant and codominant trees, which were evaluated in pure stands of this species and were fit to Schumacher growth model that according to the value of the Mean Square Error, the high value of Pseudo R^2 adjusted and residuals correct distribution correct, showed an adequate fit to the data to determine the guide curve and constructing anamorphic and polymorphic site index curves. It was established station qualities I, II, III, IV and V with values of 27, 23, 19, 15 and 11 m, respectively, at age 50 years age basis.

Key words: Dominant height, site quality, anamorphic curves, polymorphic curves, growth model, Schumacher model.

Fecha de recepción/date of receipt: 21 de marzo de 2013; Fecha de aceptación/date of acceptance: 28 de agosto de 2014.

¹ Campo Experimental Chetumal, CIR-Sureste, INIFAP. Correo-e: hernandezramosjonathan@inifap.gob.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

³ Programa de Maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

⁴ Campo Experimental Uruapan. CIR-Pacífico Centro, INIFAP

⁵ Corporación Agroforestal y Ambiental S. P. R. de R. L.

Introducción

México posee una amplia diversidad de recursos forestales y un variado potencial productivo debido a diversas características orográficas, climáticas y edáficas, mismas que aunadas a la fisiología de cada especie definen la calidad de estación forestal, la que influye en el crecimiento de los taxa en los rodales; así, diferentes calidades de estación dan lugar a bosques con múltiples dinámicas (Gadow *et al.*, 2007).

La clasificación de las superficies forestales con base en su productividad es una herramienta básica y esencial en el manejo integral del bosque, ya que es uno de los criterios más importantes que se deben considerar al momento de realizar la planeación de los tratamientos silvícolas en los programas de manejo forestal (Cornejo *et al.*, 2005).

La evaluación integral de la calidad de estación forestal se realiza mediante el cálculo del índice de sitio (IS), el cual representa la capacidad productiva de las diferentes zonas de las masas forestales (Zepeda y Rivero, 1984; Torres y Magaña, 2001) y se ha determinado a lo largo de los años por métodos directos e indirectos.

Los indirectos utilizan variables externas que afectan el crecimiento de las especies como el clima, el suelo, la fisiografía o la vegetación del sotobosque; mientras que los métodos directos están basados en la toma de información de algunas de las variables del rodal, como el volumen de la masa total a lo largo del turno, el volumen de la masa a partir de la edad o la altura dominante (Gadow *et al.*, 2007).

Estos últimos métodos y, en particular el uso de la altura dominante, han demostrado ser los más adecuados para el cálculo de dichos índices, debido a la influencia poco importante que ejercen la densidad o los tratamientos silvícolas aplicados sobre esta variable (Álvarez *et al.*, 2004). A fin de tener una producción sustentable de los ecosistemas forestales de clima templado, se han producido cambios significativos en las prácticas silvícolas utilizadas en el manejo forestal (Madriral *et al.*, 2005).

La incorporación de herramientas dasométricas a la elaboración de programas de manejo forestal es importante porque permiten a los administradores del recurso, identificar y considerar factores diversos simultáneamente en el espacio y en el tiempo; además, facilitan la toma de decisiones para la planeación de actividades en el aprovechamiento, como los niveles de producción maderable y otros bienes, así como de los tratamientos silvícolas que permiten mantener las condiciones deseables en los rodales y de la masa en general (Madriral *et al.*, 2005).

Introduction

Mexico has a wide variety of forest resources and a diverse production potential due to various topographical, climatic and soil characteristics, which added to the physiology of each species, define the quality of forest station, which influences the growth of the species in the stands; thus, different station qualities result in forests with multiple dynamics (Gadow *et al.*, 2007).

The classification of forest areas according to their productivity is a basic and essential tool in integrated forest management, as it is one of the most important criteria to consider when planning silviculture programs forest management (Cornejo *et al.*, 2005).

The holistic assessment of the quality of forest station is performed by calculating the site index (SI) which represents the productive capacity of the different areas of forests (Zepeda and Rivero, 1984; Torres and Magaña, 2001) and it has been determined over the years by direct and indirect methods.

Indirect methods use information from external variables that affect the growth of species such as climate, soil, physiography or understory vegetation; while direct methods are based on the decision information from some of the variables of the stand, and the volume of the total mass along the turn, the volume of the mass from the age and / or the dominant height (Gadow *et al.*, 2007).

These latter methods and in particular the use of dominant height, proved to be the most suitable for calculating those indexes, due to the minor influence of density or silvicultural treatments applied on this variable (Álvarez *et al.*, 2004). In order to have a sustainable production of forest ecosystems of temperate climate, there have been significant changes in silvicultural practices in forest management (Madriral *et al.*, 2005).

Incorporating mensuration tools to the development of forest management programs is important because they allow resource managers to identify and consider various factors simultaneously in space and time; also, they facilitate decision making for planning activities in their harvesting, as levels of timber production and other goods, as well as forestry treatments that maintain the desirable conditions in the stands and in the mass, in general terms (Madriral *et al.*, 2005).

The calculation of the rate of productivity in the region is one of the essential foundations to guide silvicultural forest use towards a sustainable management of resources, helping to stop the deterioration of forest areas caused by overexploitation, and justifying technically proposed treatments in the planning of timber harvesting.



El cálculo del índice de productividad en la región es una de las bases silvícolas indispensables para orientar los aprovechamientos forestales hacia un manejo sustentable de los recursos, además de que contribuye a cesar el deterioro de los macizos forestales causado por la sobreexplotación, y de que justifica técnicamente los tratamientos propuestos en la planeación de los aprovechamientos maderables.

A partir de la importancia que tiene la clasificación de las áreas forestales con base en su productividad, como herramienta indispensable para la planeación en el manejo forestal, y que este tipo de información es escasa en el estado de Hidalgo, se planteó el objetivo de estimar el índice de sitio y evaluar la factibilidad de emplear las curvas anamórficas y polimórficas para bosques naturales *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en la región oriente de la entidad.

Materiales y Métodos

El área de estudio se ubica en los municipios Acaxochitlán, Cuautepéc de Hinojosa, Singuilucan y Tulancingo de Bravo en el estado de Hidalgo. El intervalo altitudinal en el lugar está entre los 2 000 y los 3 100 m; el clima es templado de los tipos $C(w_0)$, $C(w_1)$ y $C(w_2)$ con vegetación propia de bosques de pino-encino y suelos de tipo Feozem (H), Andosol (T), Cambisol (B) y Regosol (R) (INEGI, 1992).

Se muestrearon 24 rodales puros de *P. teocote* de los que se seleccionaron los individuos dominantes y codominantes de la población, sin daños ostensibles provocados por plagas, enfermedades, factores ambientales o efectos mecánicos. Los árboles se clasificaron por clase de acuerdo a lo propuesto por Schmidt y Urzúa en 1982 (citado por Cellini *et al.*, 2002), y se tomaron datos de altura total (H) y edad (E).

Los datos obtenidos se ordenaron cronológicamente por edad y se procesaron con el paquete estadístico SAS 9.0® (Statistical Analysis System, 2003) mediante métodos iterativos, con el procedimiento NLIN y el algoritmo Gauss-Newton para ajustar el modelo de crecimiento no lineal para el cálculo de la altura dominante. Se empleó el modelo de crecimiento de Schumacher (1) cuya expresión es la siguiente:

$$H = \beta_1 e^{\beta_2 E^{-1}} \quad (1)$$

Donde:

H = Altura dominante (m).

E = Edad (años).

β s = Parámetros que deben ser estimados.

Con la finalidad de evaluar el ajuste del modelo a los datos, se tomó el valor del Cuadrado Medio del Error (CME), el valor del Pseudo coeficiente de determinación normal y ajustado (R^2

Starting from the importance of the classification of forest areas based on their productivity as an essential tool for forest management planning, and that such information is scarce in the state of *Hidalgo*, the aim to estimate the site index and to assess the feasibility of using anamorphic and polymorphic curves for *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. natural forests in the eastern region of the state was proposed.

Materials and Methods

The study area is located in *Acaxochitlán*, *Cuautepéc de Hinojosa*, *Singuilucan* and *Tulancingo de Bravo* municipalities in *Hidalgo* state. The altitude interval is between 2 000 and 3 100 m; climate is mild, of the $C(w_0)$, $C(w_1)$ and $C(w_2)$ types and soils are of the Phaeozem (H), Andosol (T), Cambisol (B) and Regosol (R) types (INEGI, 1992).

24 *P. teocote* pure stands were sampled, from which the dominant and co-dominant individuals of the population were selected, which were those without any apparent damages by plagues, diseases, environmental factor or mechanical effects. Trees are classified by class according to what Schmidt and Urzúa proposed in 1982 (quoted by Cellini *et al.*, 2002), and total height (H) and age (E) data were taken.

The resulting data were chronologically ordered by age and were processed by the SAS 9.0™ statistical package (Statistical Analysis System, 2003) through iterative methods, by the NLIN procedure and the Gauss-Newton algorithm, to fit the model of non-linear growth for the calculation of the dominant height. Schumacher's (1) growth model was used, and its mathematical expression is as follows:

$$H = \beta_1 e^{\beta_2 E^{-1}} \quad (1)$$

Where:

H = Dominant height (m)

E = Age (years)

β s = Parameters that must be estimated

With the aim to assess the fitness of the model to the data, the value of the Mean Square Error (CME, for its acronym in Spanish), the value of the Pseudo coefficient of normal and fitted determination (R^2 and R^2_{fitted}), and the normal distribution of the data in regard to residuals were taken.

To generate the family of curves of height growth the methodology of curve guide and the growth model was fitted to the age-height data base. The resulting curve was harmonized to the methodology used by Andenmatten and Letourneau (2000a) for *Pseudotsuga mensziensis* (Mirb.) Franco in Argentina; Sánchez and Castillo (2001) for *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen in Oaxaca, Mexico; Montero and Kanninen (2003) for *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel.) Exell in Costa Rica; Mares *et al.* (2004) for *Pinus herrerae*

y R^2_{ajustado}), la distribución de residuales y la distribución normal de los datos con respecto a los residuales.

Para generar la familia de curvas de crecimiento en altura, se utilizó la metodología de la curva guía y el modelo de crecimiento se ajustó a la base de datos de edad-altura. Se armonizó la curva resultante con la metodología empleada por Andenmatten y Letourneau (2000a) para *Pseudotsuga mensziensis* (Mirb.) Franco en Argentina; Sánchez y Castillo (2001) para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en Oaxaca, México; Montero y Kanninen (2003) para *Terminalia amazonia* (J. F. Gmel.) Exell en Costa Rica; Mares *et al.* (2004) para *Pinus herrerae* Martínez en Ciudad Hidalgo, Michoacán; García *et al.* (2007) para *Cedrela odorata* L en Quintana Roo, México; Jerez-Rico *et al.* (2011) para *Tectona grandis* L.f. en Venezuela; y por Crechi *et al.* (2011) para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en la Mesopotamia Argentina. Posteriormente se tomó de referencia dicha curva y se construyeron las familias de curvas anamórficas y polimórficas.

Las curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio se construyen despejando los parámetros de escala o de forma de la ecuación generada, ya que estos definen el tipo al que corresponden.

Para obtener las curvas anamórficas, en la ecuación de índice de sitio se despejó el parámetro asintótico y su expresión se sustituyó en la ecuación original, con lo que el valor asintótico se consideró implícito y los parámetros de forma son comunes para todos los sitios. Se varió la edad y el índice de sitio deseado y se mantuvo constante la edad base, con lo cual se generó la familia de curvas anamórficas (García *et al.*, 1992; Andenmatten y Letourneau, 2000b; Sánchez y Castillo, 2001; Mares *et al.*, 2004; Barreto *et al.*, 2011).

Para la familia de curvas polimórficas, en la ecuación (1) se despeja β_2 (parámetros dependientes del sitio, por ejemplo, velocidad de crecimiento) y se obtienen las expresiones integradas en el Cuadro 1. Estas ecuaciones sirvieron para generar las familias correspondientes y calificar el índice de sitio para los bosques naturales de *P. teocote*. Se consideró el valor asintótico como una constante para todos los lugares y lo que varía es la velocidad de crecimiento (García *et al.*, 1992; García *et al.*, 2007).



Martínez in Ciudad Hidalgo, Michoacán; García *et al.* (2007) for *Cedrela odorata* L. in Quintana Roo, Mexico; Jerez-Rico *et al.* (2011) for *Tectona grandis* L.f. in Venezuela; and by Crechi *et al.* (2011) for *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden in the Argentinian Mesopotamia. Afterwards, such curve was taken as a reference and anamorphic and polymorphic curve families were built.

The anamorphic and polymorphic curves of the site index are built by isolating the scale or shape parameters from the generated equation, since they define the kind to which they belong.

To get the anamorphic curves, in the site index equation the asymptotic parameter was isolated and its expression was replaced in the original equation, with which the asymptotic value was considered implicit and the shape parameters are regular for all the sites. Age and the desired site index varied and the base age kept constant, with which the anamorphic curve family was generated (García *et al.*, 1992; Andenmatten and Letourneau, 2000b; Sánchez and Castillo, 2001; Mares *et al.*, 2004; Barreto *et al.*, 2011).

For the polymorphic curve family, in equation (1) β_2 (site depending parameters [for example, growth speed]) is isolated and the expressions that appear in Table 1 are obtained. These equations were useful to create the corresponding families and to grade the site index for *P. teocote* natural forests. In these case the asymptotic value was taken as a constant for all places and what varies is growth speed (García *et al.*, 1992; García *et al.*, 2007).

Results and Discussion

In Figure 1 are graphically shown the pairs of height data ordered according to age of the 345 dominant and codominant *P. teocote* trees that come from the total sampled area, where the maximum height is 30 m and the maximum recorded age is 110 years. The data follow an expected tendency and no atypical values are observed.

The results of the analysis of variance of the regression with the used model were ordered according to the resulting statistics and the estimated parameters for the age-dominant height data of *P. teocote* in Table 2.

As it may be observed in the previous table, the Schumacher equation showed a good fit according to the Mean Square Error (CME = 11.226), the Pseudo coefficient of normal and fitted determination ($R^2 = 0.99$ and $R^2_{\text{fitted}} = 0.97$). Residuals distribution did not show unwanted tendencies.

When the accomplishment of the regression assumptions was checked, it was found that there is normality in the errors of the model, as the Shapiro - Wilk test (W : Normal = 0.99253)

Cuadro 1. Ecuación de crecimiento en altura dominante, índice de sitio, familias de curvas y calificación de índice de sitio.

Modelo	Ecuación integral	IS	Familia de curvas	Calificación de IS
Schumacher (anamórfica)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = IS e^{-\beta_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$	$IS = H e^{-\beta_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$
Schumacher (polimórfica)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = \beta_1 \left(\frac{IS}{\beta_1} \right)^{\frac{E_0}{E}}$	$IS = \beta_1 \left(\frac{H}{\beta_1} \right)^{\frac{E}{E_0}}$

H = Altura dominante; E_0 = Edad base (años); β 's = Parámetros a ser estimados; IS = Índice de sitio.; E = Edad (años).

Table 1. Equation of dominant height growth, site index, curves family and qualification of site index.

Model	Holistic equation	SI	Curves family	Qualification of SI
Schumacher (anamorphic)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = IS e^{-\beta_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$	$IS = H e^{-\beta_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$
Schumacher (polymorphic)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = \beta_1 \left(\frac{IS}{\beta_1} \right)^{\frac{E_0}{E}}$	$IS = \beta_1 \left(\frac{H}{\beta_1} \right)^{\frac{E}{E_0}}$

H = Dominant height; E_0 = Base age (years); β 's = Parameters to be estimated; IS = Site index; E = Age (years).

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestran gráficamente los pares de datos de altura ordenados en función de la edad de 345 árboles dominantes y codominantes de *P. teocote* procedentes de la totalidad del área muestreada, de los cuales la altura máxima es de 30 m y la edad máxima registrada de 110 años. Los datos siguen una tendencia deseable y no se observan valores atípicos.

Los resultados del análisis de varianza de la regresión con el modelo utilizado se ordenan en función de los estadísticos calculados y los parámetros estimados para los datos de edad-altura dominante de *P. teocote* en el Cuadro 2



was close to 1 ($Pr < W = 0.082$). In addition, residuals behaved as a straight line compared to the normal and its percentages resemble a Gauss bell (Figure 2) as stated by Velazco *et al.* (2006).

The calculated statistics were replaced in the Schumacher model (1), which gave place to the following equation:

$$H = 28.4425e^{-21.9124E^{-1}}$$

From the generated equation the dominant height or guide curve of the *P. teocote* trees in natural forests was determined, in an age range from one to 110 years. For example, for an age of 25 years, this value is replaced in the equation and the outcome is a dominant age of 11.28 m (Figure 3).

An important factor to be considered previously to the generation of the curve families is to define the base age, which was fixed at 50 years since the forest management plants in Hidalgo state for *Pinus teocote* is at that age as the indicative for the turn; some authors like Castillo *et al.* (2013) report it as the base age for this species.

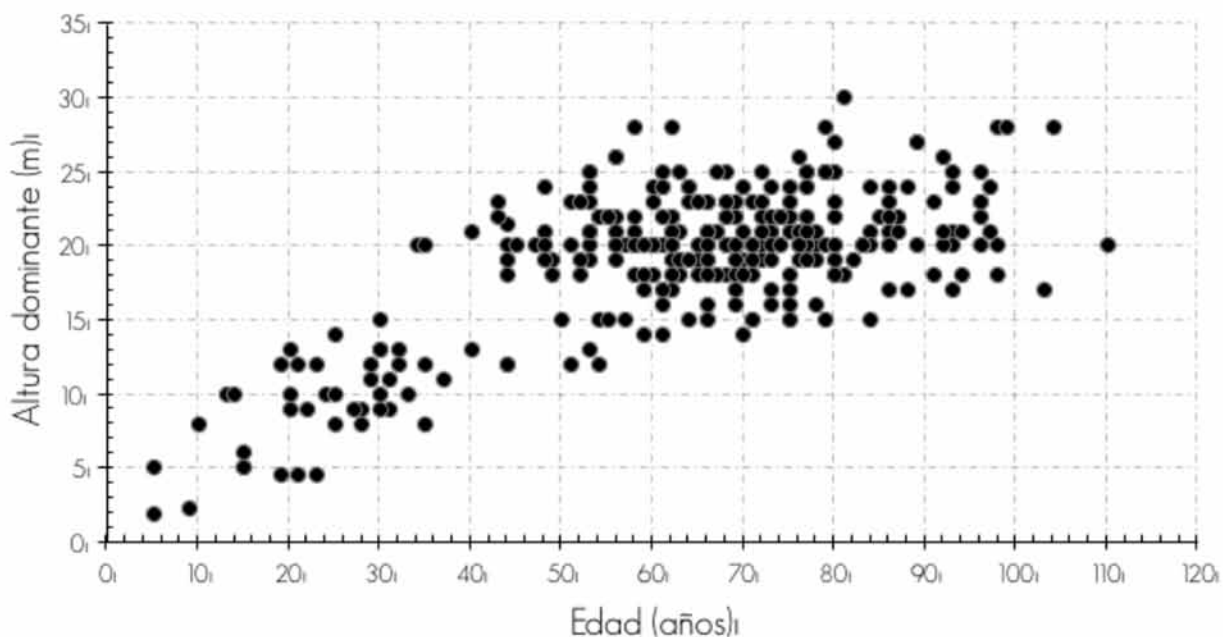


Figura 1. Representación de los valores de edad-altura de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo.

Figure 1. Scheme of the age-height values of natural *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. forests at Eastern *Hidalgo* state.

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza para la ecuación de crecimiento en altura dominante de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo.

*Modelo	R^2	$R^2_{ajustada}$	CME	β_1	β_2
Schumacher	0.997085	0.971957	11.226	28.4425	-21.9124

* R^2 = Pseudo coeficiente de correlación; CME = Cuadrado Medio del Error; β 's = Parámetros estimados.

Table 2. Summary of the analysis of variance for the dominant height growth equation of natural *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. forests at Eastern *Hidalgo* state.

*Model	R^2	$R^2_{ajustada}$	CME	β_1	β_2
Schumacher	0.997085	0.971957	11.226	28.4425	-21.9124

* R^2 = Pseudo correlation coefficient; CME = Mean Square Error; β 's = Estimated parameters.



En el cuadro 2 se observa que la ecuación de Schumacher mostró un buen ajuste de acuerdo a los valores del Cuadrado Medio del Error (CME = 11.226), el Pseudo coeficiente de determinación normal y ajustado ($R^2 = 0.99$ y $R^2_{ajustada} = 0.97$). La distribución de residuales no presentó tendencias indeseables.

Al verificar el cumplimiento de los supuestos de regresión resultó que hay normalidad de los errores en el modelo, ya que la prueba de Shapiro - Wilk (W: Normal = 0.99253) fue cercana a 1 (Pr < W = 0.082). Además, los residuales se comportaron como una línea recta al respecto con la normal y sus porcentajes se asemejan a una campana de Gauss (Figura 2) como lo mencionan Velazco *et al.* (2006).

When age (E) becomes equal to the base age ($E_0 = 50$ years), then the dominant height (H) will be the same as the site index (IS), as shown in equation 2.

$$IS = 28.4425e^{-21.9124*51} \quad (2)$$

Once the base age is defined and the tendency of the curve guide (Figure 3) with the previous equation, five values or site index labels that belong to the 11, 15, 19, 23 and 27 m values. For the construct of anamorphic and curve families, the values in the equation in its respective form were replaced, as shown in equations (3) and (4):

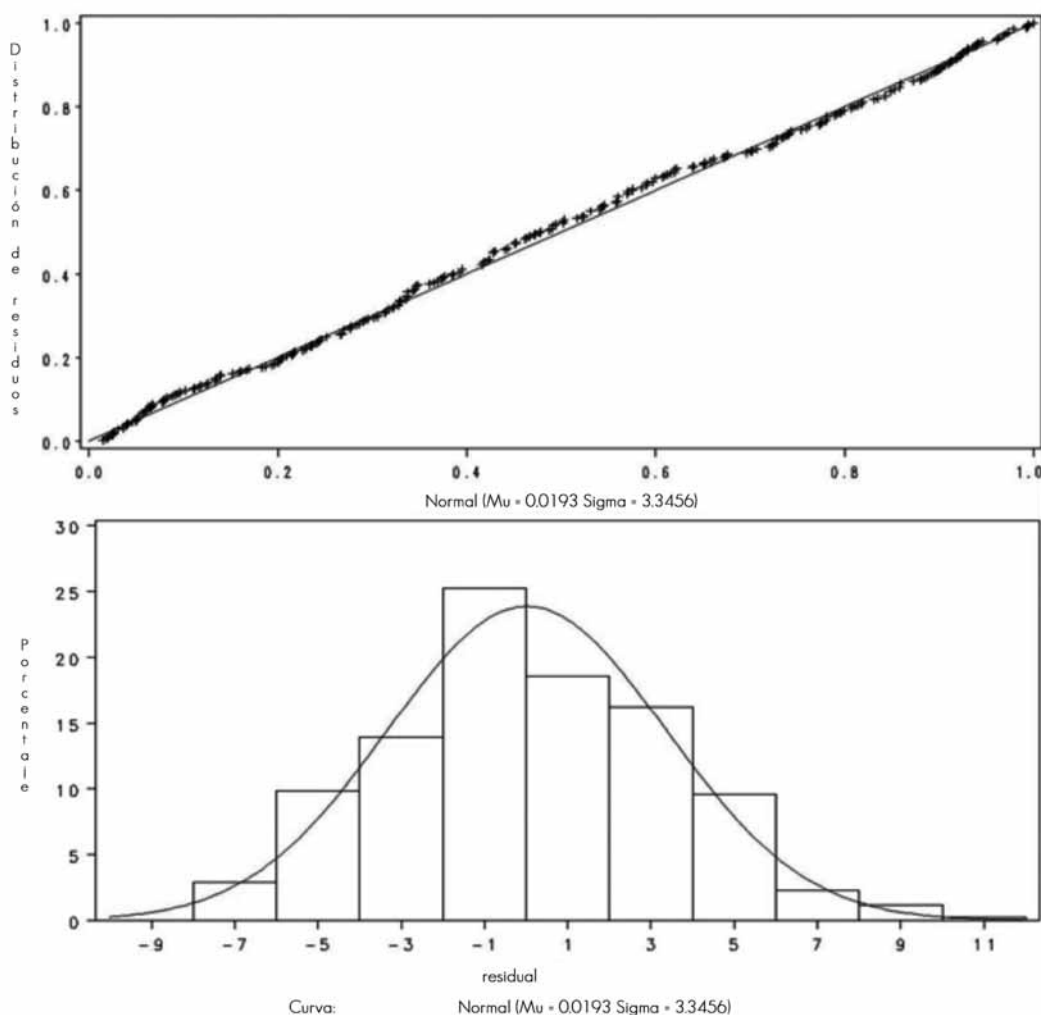


Figura 2. Pruebas de normalidad para la distribución de residuales de los datos de edad-altura dominante en bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo.

Figure 2. Normality tests for the distribution of residuals of the age-dominant height data in *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. natural forests at Eastern Hidalgo state.

Los estadísticos calculados se sustituyeron en el modelo de Schumacher (1), lo que dio lugar a la siguiente ecuación:

$$H = 28.4425e^{-21.9124E}$$

A partir de la ecuación generada se determinó la altura dominante o curva guía de los árboles de *P. teocote* en bosques naturales, en un intervalo de edades de uno a 110 años. Por ejemplo, para una edad de 25 años, este valor se sustituye en la ecuación y se obtiene una altura dominante de 11.28 m (Figura 3).

Anamorphic forms: $H = ISe^{-21.9124(E_0^{-1}-E)} \quad (3)$

Polymorphic forms: $H = 28.4425\left(\frac{IS}{28.4425}\right) \quad (4)$

In figures 4 and 5 are observed site index curves families of anamorphic and polymorphic types, respectively, which allow to classify natural forests of *P. teocote* according to their productivity potential. This clearly differentiates site quality thereof, identify the timber productivity of stands and plan forestry activities in forest cover (McKenney and Pedlar, 2003), taking into account that the quality may vary with soils where the species develops (Delgado *et al.*, 2009).

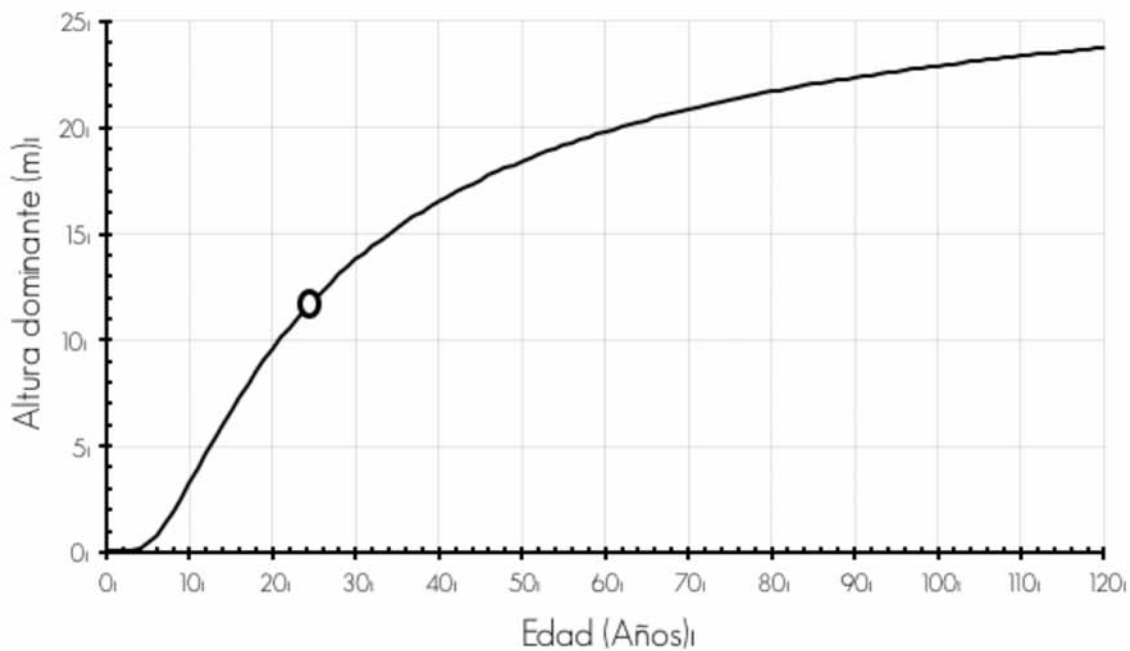


Figura 3. Crecimiento en altura dominante para *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en bosques naturales en el oriente del estado de Hidalgo.

Figure 3. Dominant height growth in *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. natural forests at Eastern Hidalgo state.

Un aspecto importante que se debe considerar antes de generar las familias de curvas es definir la edad base, la cual se estableció en 50 años, ya que en los programas de manejo forestal para *P. teocote* en el estado de Hidalgo esa edad es la indicada del turno; así, por ejemplo, algunos autores como Castillo *et al.* (2013) la utilizan como base para esta especie.

Cuando la edad (E) se hace igual a la edad base ($E_0 = 50$ años), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS), tal como se muestra en la ecuación 2.

This system of equations expresses the quality of site in the absolute values of dominant height, which allows the comparison with other forest areas for the same species in other regions. The growth trend of the curves generated is similar to that reported for other species of the *Pinus* genus (Andenmatten and Letourneau, 2000b; Sánchez and Castillo, 2001; Mares *et al.*, 2004; Madrigal *et al.*, 2005; Rodríguez and Arteaga, 2005; Cornejo *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2010).



$$IS = 28.4425e^{-21.9124 \cdot 50} \quad (2)$$

Una vez definida la edad base y la tendencia de la curva guía (Figura 3) con la ecuación anterior, se utilizaron cinco valores o etiquetas de índice de sitio correspondientes a los 11, 15, 19, 23 y 27 m. Para la construcción de la familia de curvas anamórficas y polimórficas, se sustituyeron los valores en la ecuación en su forma respectiva, como se indica en las ecuaciones (3) y (4):

Forma anamórficas: $H = IS e^{-21.9124(E_0^{-1} - E)} \quad (3)$

Forma polimórfica: $H = 28.4425 \left(\frac{IS}{28.4425} \right) \quad (4)$

En las figuras 4 y 5 se ilustran las familias de curvas de índice de sitio de los tipos anamórficas y polimórficas, respectivamente, las cuales permiten clasificar los bosques naturales de *P. teocote* de acuerdo a su potencial de productividad. Esto permite diferenciar con claridad la calidad de estación, identificar la productividad maderable de los rodales y planear las actividades silvícolas en la masa forestal (McKenney y Pedlar, 2003), al tomar en cuenta que la calidad de estación puede variar por la capacidad de los suelos donde se desarrolle la especie (Delgado *et al.*, 2009).

Este sistema de ecuaciones expresa la calidad de sitio

Some users of the site index curves mistakenly think that the purpose of the site index procedures is predicting the height of the stand at a specified age. The real goal is to select the pattern of development in height and the stand can be expected to continue for the rest of its life as a means to qualify site productivity (Clutter *et al.*, 1983).

Figure 6a shows that, in general, the estimated anamorphic index curves site cover the trend of the interval of data dispersal, which confirms that the proposed method is suitable to the purpose of the present research study, while in the family of polymorphic curves (Figure 6b) reveals that at younger ages curves overestimate, while at higher ages, the curves generated for classes of high site index tend to underestimate the observed values. The comparison of both methods of construction of families of curves was made based on the accuracy with which the estimated values represent the observed values (García *et al.*, 2007).

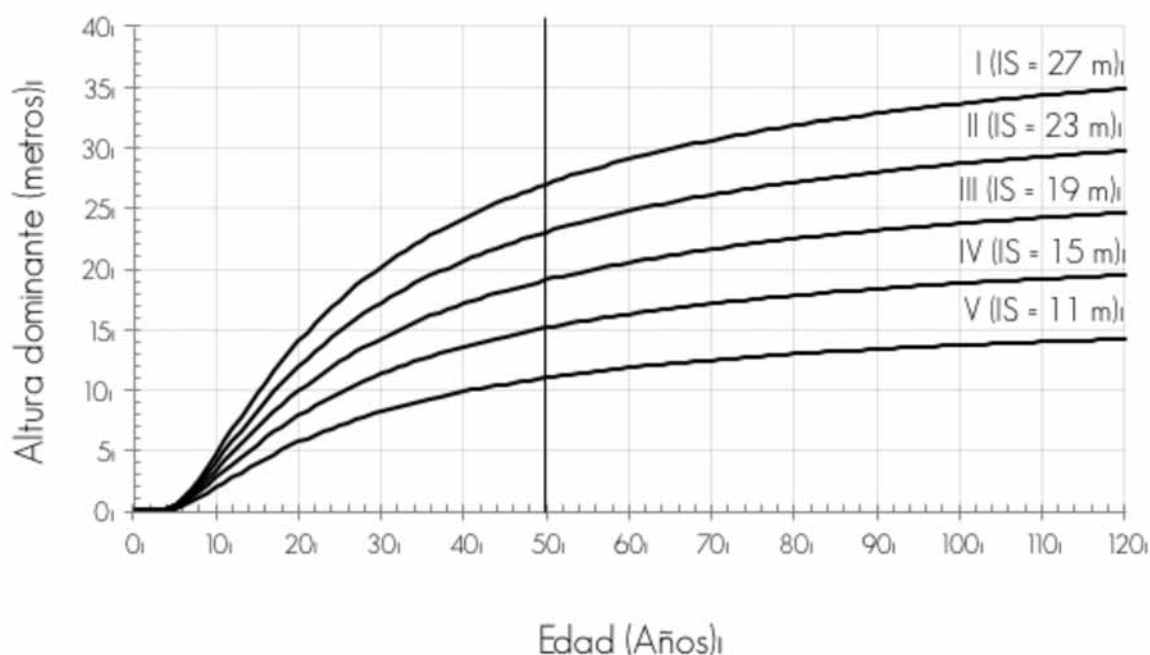


Figura 4. Familia de curvas anamórficas de índice de sitio para *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. a una edad base de 50 años en bosques naturales del oriente del estado de Hidalgo.

Figure 4. Anamorphic curve family of *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. site index at a base age of 50 years in natural forests of Eastern Hidalgo state.

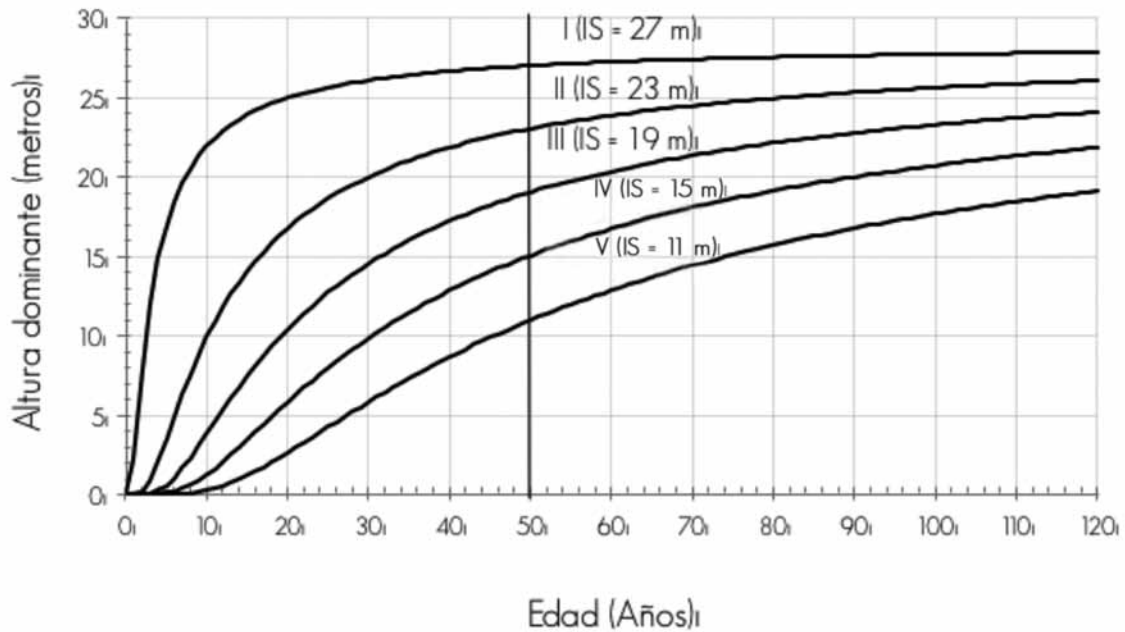


Figura 5. Familia de curvas polimórficas de índice de sitio para *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. a una edad base de 50 años en bosques naturales del oriente del estado de Hidalgo.

Figure 5. Polymorphic curve family of *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. site index at a base age of 50 years in natural forests of Eastern Hidalgo state.

en los valores absolutos de altura dominante permite la comparación con otros macizos forestales para la misma especie en otras regiones. La tendencia de crecimiento de las curvas generadas es similar a lo consignado para otras especies del género *Pinus* (Andenmatten y Letourneau, 2000b; Sánchez y Castillo, 2001; Mares *et al.*, 2004; Madrigal *et al.*, 2005; Rodríguez y Arteaga, 2005; Cornejo *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2010).

Algunos usuarios de las curvas de índice de sitio piensan, erróneamente, que el objetivo de los procedimientos de índice de sitio, es la predicción de la altura del rodal a una edad indicada. El verdadero propósito es la selección del patrón de desarrollo en altura que el rodal puede esperar seguir durante el resto de su vida como un medio para calificar la productividad del sitio (Clutter *et al.*, 1983).

En la Figura 6a se observa que en general, las curvas anamórficas de índice de sitio estimadas cubren la tendencia del intervalo de dispersión de los datos, lo que demuestra que el método propuesto es adecuado al objetivo del trabajo, mientras que en la familia de curvas polimórficas (Figura 6b) se observa que a edades menores las curvas sobrestiman, mientras que a edades mayores, las curvas generadas para clases de índice de sitio altas tienden a subestimar los valores observados. La comparación de ambos métodos de construcción de las familias de curvas se realizó con base en

From the guide curve, the base age defined in 50 years and the five curves in site index of 11, 15, 19, 23 and 27 m established, with quality station labels of I, II, III, IV and V, respectively, the system of anamorphic and polymorphic curves representing different dominant height growth in the region to *P. teocote* could be made. The varied growths are attributed to different seed sources, types of soil in which the species develops (Montero *et al.*, 2001; Tamarit *et al.*, 2014), environmental characteristics, bulk density (Prodan *et al.*, 1997) or the conditions of forest management.

For example, if there is a stand 50 years old and a height of 26 m, it is determined that the quality of station of this stand is I, and, therefore, intense cutting may be proposed since the productive capacity of the site to develop *P. teocote* is good. However, if the stand is the same age but height is 10 m, it falls within site quality V, which means that the productive capacity of the place is low, so that the applied forestry treatments have to be more conservative.



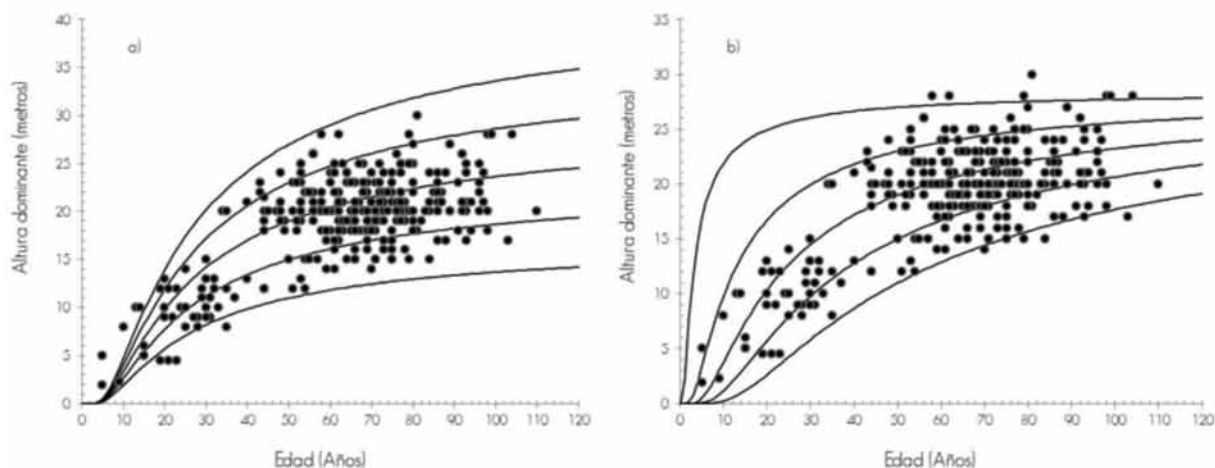


Figura 6. Comparación gráfica de valores observados y predichos de las familias de curvas anamórficas (a) y polimórficas (b) de índice de sitio para *Pinus teocote* Schlecht. & Cham., a una edad base de 50 años en bosques naturales del oriente del estado de Hidalgo.

Figure 6. Graphical comparison of observed and predicted values of the families of site index anamorphic (a) and polymorphic (b) curves for *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. a base age of 50 years old in natural forests of eastern state of Hidalgo.

la fidelidad con que los valores estimados representa a los valores observados (García *et al.*, 2007).

A partir de la curva guía, la edad base definida en 50 años y establecidas las cinco curvas en los índices de sitio de 11, 15, 19, 23 y 27 m, con etiquetas de calidad de estación I, II, III, IV y V, respectivamente, se pudo elaborar el sistema de curvas anamórficas y polimórficas que representan los diferentes crecimientos de altura dominante en la región para *P. teocote*. Los crecimientos variados se atribuyen a las diferentes fuentes de semilla, los tipos de suelo en que se desarrolla la especie (Montero *et al.*, 2001; Tamarit *et al.*, 2014), las características ambientales, la densidad de la masa (Prodan *et al.*, 1997) o bien las condiciones de manejo del bosque.

Por ejemplo, si se tiene un rodal de 50 años de edad y una altura de 26 m, se determina que la calidad de estación de este rodal es de I, por lo cual se podrán proponer tratamientos con intensidades de corta fuertes, ya que la capacidad productiva del lugar para desarrollar a *P. teocote* es buena. Sin embargo, si el rodal tiene la misma edad pero una altura de 10 m, se clasificará dentro de la calidad de estación V, lo que indica que la capacidad productiva del lugar es baja, por lo que los tratamientos silvícolas aplicados tendrán que ser más conservadores.

Conclusions

Schumacher model showed a good fit to the sampled data base of age-dominant height and it is suitable for predicting dominant height growth of *P. teocote* in the study area.

The generated polymorphic growth curves overestimate dominant tree height for site index stands with higher quality at a young age and underestimate it in poor sites.

The families of anamorphic site index curves represent more accurately the range of dispersal values, so that they are appropriate to qualify the site index of *P. teocote* natural forests in eastern state of Hidalgo.

The Schumacher model can be used to build site index curves in the region; these equations shall be applied within the range of dimensional variables and ages included in the study.

With the generated equations, the classification of the productive capacity of forest areas of *P. teocote* in the eastern part of the state of Hidalgo, it will be much more accurate and contribute as a basic and fundamental tool in planning forest harvesting in this region, and technically justify the application of intensive forestry treatments under conditions of high site indexes and will guide forest resource managers to propose options that will help direct forest management towards sustainability of forest productivity. 🌱



Conclusiones

El modelo de Schumacher mostró un buen ajuste a la base de datos muestrales de edad-altura dominante y es apropiado para predecir el crecimiento en altura dominante de *P. teocote* en la zona de estudio.

Las curvas polimórficas generadas sobrestiman el crecimiento en altura dominante de los árboles para los rodales con índice de sitio de mayor calidad a edades tempranas y la subestiman en calidades de sitio pobres.

Las familias de curvas anamórficas de índice de sitio representan con mayor fidelidad el intervalo de dispersión de los valores, por lo que son las adecuadas para calificar el índice de sitio de bosques naturales de *P. teocote* en el oriente del estado de Hidalgo.

El modelo de Schumacher puede ser utilizado para construir curvas de índice de sitio en la región; las ecuaciones generadas deberán ser aplicadas dentro del intervalo de las variables dimensionales y las edades consideradas en el estudio.

Con las ecuaciones generadas, la clasificación de la capacidad productiva de las superficies forestales de *P. teocote* en el oriente del estado de Hidalgo, será mucho más precisa y contribuirá como herramienta básica y fundamental en la planeación de los aprovechamientos forestales en esta región; además, justificará técnicamente la aplicación de tratamientos silvícolas intensos en condiciones de índices de sitio altos y orientará a los administradores del recurso forestal a proponer opciones que direccionen el manejo forestal sustentable del estado hacia la sostenibilidad de la productividad de los bosques. 🌿

Agradecimientos

Se agradece a la Corporación Agroforestal y Ambiental S.P.R. de R.L. (Coafa), por el financiamiento para el desarrollo de la investigación.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por Autor

Jonathan Hernández-Ramos: desarrollo de la investigación, captura de datos y análisis estadístico, estructuración y elaboración del manuscrito; J. Jesús García-Magaña: planeación, diseño y desarrollo del trabajo de campo, análisis de resultados, revisión del manuscrito; Xavier García-Cuevas: análisis estadísticos, ajuste de los modelos probados, revisión del manuscrito; Adrián Hernández-Ramos: desarrollo de la investigación, captura y análisis de los datos, revisión del manuscrito; H. Jesús Muñoz-Flores: planeación, diseño y desarrollo del trabajo de campo, análisis de resultados, revisión del manuscrito; Manuel Samperio Jiménez: desarrollo de la investigación, toma de datos de campo, captura y análisis de los datos, evaluación de la aplicación de los resultados.

Acknowledgments

The authors wish to express their gratitude to the *Corporación Agroforestal y Ambiental S.P.R. de R.L. (Coafa)*, for the financial support they provided for this work.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interests.

Author Contributions

Jonathan Hernández-Ramos: development of the research study, data capture and statistical analysis, structure and writing of the document; J. Jesús García-Magaña: planning, design and development of field work, analysis of results, review of the document; Xavier García-Cuevas: statistical analysis, fit of the tested models and review of the document; Adrián Hernández-Ramos: development of the research study, data capture and analysis, review of the document; H. Jesús Muñoz-Flores: planning, design and development of field work, analysis of results and review of the document; Manuel Samperio Jiménez: development of the research study, field work, data capture and analysis, assessment of the application of results.

End of the English version



Referencias

- Álvarez G., J. G., M. Barrio A., U. Diéguez A. y A. Rojo A. 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Actas de la Reunión de Modelación Forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18:303-309.
- Andenmatten, E. y F. Letourneau. 2000a. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para *Pinus oregon* (*Pseudotsuga mensziensis* (Mirb) Franco) de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Bariloche, Río Negro, Argentina. Comunicación Técnica Núm. 9. 10 p.
- Andenmatten, E. y F. Letourneau. 2000b. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para *Pinus ponderosa* (Douglas) Laws de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Bariloche, Río Negro, Argentina. Comunicación Técnica Núm. 14. 11 p.
- Barreto-Medel, H., M. Frederic, G. Nepveu y D. Álvarez-Lazo C. 2011. Curvas anamórficas de índice de sitio para Plantaciones de *Pinus caribea* Morelet var. *caribea* Barret y Golfari de la empresa forestal integral MACURIE (IFI) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales 17(2): 245-252.
- Castillo L., A., B. Vargas-Larreta, J. J. Corral R., J. A. Nájera L., F. Cruz C. y F. J. Hernández. 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.
- Cellini J., M., E. Martínez P., E. Wabo y V. Lencinas M. 2002. Modelos de perfil de tronco en *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser y su utilización en el cálculo del volumen total. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales 11 (2): 245-262.
- Cornejo O., E. H., J. A. Pereyra G., O. Mares A., S. Valencia M. y C. Flores L. 2005. Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. Revista Fitotecnia Mexicana, 28 (3): 213-219.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, I. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. Wiley & Sons. New York, NY, USA. 333 p.
- Crechi, E. H., H. Fassola E., E. Keller A. y Barth S. R. 2011. Desarrollo de funciones de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina. Revista de Investigación Agropecuaria 37 (3): 238-248.
- Delgado-Caballero, C. E., A. Gómez-Guerrero, J. A. García-Salazar, J. R. Valdez-Lazalde, H. M. De los Santos P., A. M. Fierros-González y W. R. Horwath. 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.
- Gadow, K. V., S. Sánchez O y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento de bosque. University of Santiago de Compostela. http://www.usc.es/uxfs/IMG/pdf/Estructura_y_crecimiento_de_bosque-2.pdf (14 de febrero de 2014).
- García, C. X., C. Parraguirre y B. Rodríguez. 1992. Modelos de crecimiento para una plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King). Ciencia Forestal en México 17 (71): 87-102.
- García C., X., J. G. Flores G. y J. D. Benavides S. 2007. Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. (Cedro Rojo) en Quintana Roo. Ciencia Forestal en México 4 (32): 101-148.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). 1992. Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F., México. pp. 29-32.
- Jerez-Rico, M., A. Y. Moret-Barillas y O. E. Carrero-Gamez. 2011. Curvas de índice de sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L. f.). Agrociencia 45 (1): 135-145.
- Madrigal H., S., J. Moreno Ch. y I. Vázquez C. 2005. Comparación de dos métodos de construcción de curvas de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. Región Hidalgo-Zinapécuaro, Michoacán. Ciencia Nicolaita 40 (1): 157-172.
- Mares, A. O., E. H. Cornejo O., S. Valencia M. y C. Flores L. 2004. Índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en Cd. Hidalgo, Michoacán. Revista Fitotecnia Mexicana. 27 (1): 77-80.
- McKenney, D. W., and J. H. Pedlar. 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. Forest Ecology Management 175:497-507.
- Montero M., M., L. Ugalde y M. Kanninen. 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.
- Montero, M. y M. Kanninen. 2003. Índice de sitio para *Terminalia amazónica* en Costa Rica. Agronomía Costarricense 23 (1): 29-35.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura forestal. Serie de investigación y evaluación en desarrollo sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)/ Darstellung der Ziele und der Umsetzung der Entwicklungspolitik der Bundesrepublik Deutschland (BMZ). San José, Costa Rica. 561 p.
- Rodríguez-Acosta, M. y B. Arteaga-Martínez. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales 11 (1): 39-44.
- Sánchez V., N. M. y R. F. Castillo S. 2001. Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. Foresta Veracruzana 3 (2): 9-12.
- Statistical Analysis System. 2003. Statistical Analysis Ver. 9.0 SAS Institute, Inc. Cary, NC. USA. s/p.
- Tamarit-Urias, J. C., H. M. De los Santos-Posadas, A. Aldrete, J. R. Valdez-Lazalde, H. Ramírez-Maldonado, V. Guerra-De la Cruz. 2014. Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. Agrociencia 48 (2): 225-238.
- Torres, J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de Plantaciones Forestales. Ed. Limusa. México, D.F., México. 472 p.
- Vargas-Larreta, B., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas y O. Aguirre-Calderón. 2010. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. Revista Fitotecnia Mexicana, 33 (4): 343-351.
- Velazco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., A. González H. y F. Moreno Sánchez. 2006. Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pinos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México D. F., México. Libro Técnico Núm. 1. 34 p.
- Zepeda B., E. M. y P. Rivero B. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio. Ejemplificación del método de la curva guía. INIFAP. Ciencia Forestal en México 9 (51): 3-38.

