

CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE EN PLANTACIONES DE *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen

GROWTH AND TIMBER YIELD OF *Pinus chiapensis*

Reynol Fierros-Mateo¹, Héctor M. De los Santos-Posadas^{1*}, Manuel A. Fierros-González¹, Francisco Cruz-Cobos²

¹Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. (hmsantos@colpos.mx). ²Instituto Tecnológico de El Salto, Durango.

RESUMEN

Un Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM) es un conjunto de modelos que describen cuantitativamente el crecimiento y rendimiento de los rodales a través del tiempo. El objetivo del presente estudio fue construir un SCRM como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el manejo de plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Los datos se tomaron de 44 sitios establecidos en 2013 en Tlatlauquitepec, Puebla, México, y medidos nuevamente en 2014. Los componentes del sistema se generaron mediante el método de diferencia algebraica. El ajuste se realizó con la técnica de Regresión Aparentemente no Relacionada (SUR) como un sistema de ecuaciones simultáneas. Para la altura dominante, el modelo de Hossfeld IV polimórfico fue el más apropiado. Los modelos para el área basal, número de árboles y volumen, explicaron entre 80.9 % y 99.9 % de la variación total observada. La tabla de rendimiento indicó que en sitios de productividad baja (índice de sitio de 10 m), el Incremento Corriente Anual (ICA) máximo en volumen ocurre a los 14 años, con volumen potencial de 25.18 m³ ha⁻¹ y rendimiento medio de 196.84 m³ ha⁻¹. En índices de sitio promedio (14 m), el ICA máximo en volumen sucede a los 11 años, con volumen potencial de 32.73 m³ ha⁻¹ y rendimiento medio de 199.21 m³ ha⁻¹. En sitios de productividad alta (18 m) el ICA máximo sucede a los 9 años con volumen potencial de 40.66 m³ ha⁻¹ y rendimientos de 200.97 m³ ha⁻¹. El turno absoluto en volumen estimado en estos sitios sucede a los 17 años con rendimientos de 472.39 m³ ha⁻¹. En sitios promedio el turno absoluto es a los 20 años con rendimientos de 453.54 m³ ha⁻¹. En sitios de baja productividad este turno se acerca a los 25 años con rendimientos de 441.64 m³ ha⁻¹.

ABSTRACT

A Timber Growth and Yield System (TGYS) is a set of models that quantitatively describe the growth and yield of forest stands over time. The aim of this study is to build a TGYS as a support tool for decision-making in the management of *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Data were collected from 44 plots established in 2013 at Tlatlauquitepec, Puebla, Mexico, and measured again in 2014. The components of the system were generated by the algebraic difference approach. The fitting was done with the seemingly unrelated regression technique (SUR) as a system of simultaneous equations. For the dominant height, Hossfeld IV polymorphic model was the most appropriate. Models for the basal area, number of trees and volume explained between 80.9 % and 99.9 % of the total variation. The yield table indicates that in low productivity sites (site index of 10 m), the maximum current annual increment (CAI) in volume occurs at 14 years, with a potential volume of 25.18 m³ ha⁻¹ and an average yield of 196.84 m³ ha⁻¹. In sites of mean index (14 m), the maximum CAI in volume takes place at 11 years, which has a potential volume of 32.73 m³ ha⁻¹ and an average yield of 199.21 m³ ha⁻¹. In high productivity areas (18 m), maximum CAI takes place at 9 years, with a potential volume of 40.66 m³ ha⁻¹ and yield of 200.97 m³ ha⁻¹. The estimated volume rotation at these sites occurs at 17 years, with a yield of 472.39 m³ ha⁻¹. On average sites, the absolute volume rotation occurs at 20 years with yields of 453.54 m³ ha⁻¹. At low productivity sites, this rotation is close to 25 years with a yield of 441.64 m³ ha⁻¹.

Keywords: Algebraic difference, *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, dominant height, performance chart, prediction, projection.

INTRODUCTION

Sustainable forest management includes estimating timber growth and yield of forest stands through predictive modeling and

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2016. Aprobado: septiembre, 2016.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 201-214. 2017.

Palabras clave: Diferencia algebraica, *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, altura dominante, tabla de rendimiento, predicción, proyección.

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable de los bosques incluye estimar el crecimiento y rendimiento maderable de rodales a través de modelos de predicción y proyección. Por ello, el administrador forestal debe tener herramientas silvícolas que le permitan estimar adecuadamente los cambios de un rodal para definir estrategias de manejo forestal y, así, lograr el rendimiento sostenido (De la Fuente *et al.*, 1998). En bosques con manejo intensivo es necesario tener modelos de crecimiento y rendimiento que describan de manera adecuada el comportamiento de las variables del rodal en el tiempo y, además, incluyan condiciones distintas de manejo para apoyar la inversión realizada en ellos mediante prácticas silvícolas intensivas (García, 1994; Zepeda y Acosta, 2000).

Los modelos de predicción del crecimiento y rendimiento facilitan la toma de decisiones porque permiten planear la cosecha, evaluar regímenes o tratamientos de manejo alternativos y pueden usarse como una herramienta básica para la evaluación financiera. Sin estas herramientas es difícil desarrollar planes de manejo forestal eficientes (Valdez y Lynch, 2000; Torres y Magaña, 2001). Así, el Índice de Sitio (IS) permite al administrador forestal clasificar y proyectar el crecimiento del rodal, lo cual es un medio eficaz y simplificado para evaluar la productividad forestal (Torres y Magaña, 2001; De los Santos *et al.*, 2006).

La implementación de sistemas de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM) se desarrolla en México en masas naturales coetáneas y en plantaciones, con el objetivo de producir y aprovechar madera (Zepeda y Domínguez, 1998; Galán *et al.*, 2008; Magaña *et al.*, 2008). La función de los SCRM es predecir el cambio a través del tiempo de las variables de estado de un rodal: altura dominante (HD), el área basal (AB), el número de árboles (NA) y el volumen (V) (Santiago *et al.*, 2013; Tamarit *et al.*, 2013). Las ecuaciones que componen el sistema describen relaciones entre las variables de interés, basadas en el supuesto de que todas las relaciones ocurren de forma simultánea. Los modelos que conforman el SCRM

proyecciones. Therefore, forest managers should have forestry tools that allow to properly estimate the changes in a stand, to define forest management strategies, and thus achieve sustained performance (De la Fuente *et al.*, 1998). On intensively managed forests it is necessary to have growth and yield models that adequately describe the behavior of the forest stands variables throughout time, and at the same time, include different management conditions in order to support their investment through intensive silviculture (García 1994; Zepeda and Acosta, 2000).

Growth and yield prediction models facilitate decision making because they allow harvest planning, evaluation of alternative managing or handling regimes and can be used as basic tools for financial evaluation. Without these tools it is difficult to develop effective forest management plans (Valdez and Lynch, 2000; Torres and Magaña, 2001). Thus, the Site Index (SI) allow forest managers to classify and project the stand growth, which is a simplified and effective way to assess forest productivity (Torres and Magaña, 2001; De los Santos *et al.*, 2006).

The implementation of timber growth and yield systems (TGYS) takes place in Mexico in even-aged natural forests and plantations aimed to produce and harvest timber (Zepeda and Domínguez, 1998; Galán *et al.*, 2008; Magaña *et al.*, 2008). The role of TGYS is to predict the change over time of the state variables of a forest stand: dominant height (DH), basal area (BA), number of trees (NT) and volume (V) (Santiago *et al.*, 2013; Tamarit *et al.*, 2013). The equations that make up the system describe the relationships between the variables of interest, based on the assumption that all relationships occur simultaneously. The models that make the TGYS can have various features; one of the most desirable is time compatibility that depends on the simultaneous relationships that the variables present (Borders and Bailey, 1986).

Buckman (1962) initiated the development of compatible systems and established that the growth components are interrelated. Alternatively, Clutter (1963) developed equations expressed in the form of algebraic difference. This technique can generate dynamic prediction and projection equations that, due that they are obtained from the same base model, are compatible as they share the same estimators of the parameter values (García, 1988; García, 1994; Tamarit *et al.*, 2013).

pueden tener varias características y una de las más deseables es la compatibilidad en el tiempo y que dependa de las relaciones simultáneas que presentan las variables (Borders y Bailey, 1986).

Buckman (1962) inició el desarrollo de los sistemas de tipo compatible y estableció que los componentes del crecimiento están relacionados entre sí y de manera alternativa. Clutter (1963) desarrolló las ecuaciones expresadas en forma de diferencia algebraica. Con esta técnica se pueden generar ecuaciones dinámicas de predicción y proyección, que al obtenerse de un mismo modelo base, resultan compatibles al compartir los mismos valores de los estimadores de los parámetros (García, 1988; García, 1994; Tamarit *et al.*, 2013).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un SCRM mediante modelado de predicción explícita que permita simular escenarios para el manejo silvícola y estimar el volumen maderable potencial en plantaciones de crecimiento rápido de *P. chiapensis* Martínez Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla, México, donde la madera de esta especie es valorada, pero escasa en los bosques naturales de la región, por lo cual está bajo protección especial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos se obtuvieron cronológicamente de 44 parcelas permanentes de muestreo de 400 m², establecidas en 105 ha de plantaciones de *P. chiapensis* en el municipio de Tlatlauquitepec. Estas plantaciones se encuentran a 19° 36' 24" N y 97° 14' 42" O y una altitud promedio de 1900 m. El clima en la región es templado húmedo con abundantes lluvias en verano, temperatura promedio anual de 15.6 °C y una precipitación promedio anual de 1435 mm.

Las parcelas cubrieron las condiciones de crecimiento, como edad (de 1 a 8 años), densidad y calidad de sitio. La información dasométrica obtenida de los sitios fue altura dominante (HD en m) de 10 árboles dominantes y codominantes, con la finalidad de optimizar la proporcionalidad y equivalencia de muestrear en promedio 100 árboles ha⁻¹ (Alder, 1980); diámetro normal con corteza de todos los árboles (Dn en cm) y número de árboles vivos dentro de los sitios (NA). Las alturas medidas se asumieron como una submuestra de la población y se usaron para estimar la altura total de cada árbol mediante un modelo de altura en función del diámetro normal (Dn). Las funciones ajustadas fueron el modelo Schumacher (1) y el modelo de Chapman-Richards de dos parámetros o modelo mono-molecular (2).

The aim of this study was to develop an explicit TGYS prediction modeling that allows to simulate scenarios for forestry management and estimate the potential timber volume in fast-growing plantations of *P. chiapensis* Martínez Andresen, at Tlatlauquitepec, Puebla, Mexico. The woods of this species is valued in the area but scarcely found in the natural forests of the region, which is the reason why this species is under special protection.

MATERIALS AND METHODS

Data was chronologically obtained from 44 permanent sample plots of 400 m², set in 105 hectares of *P. chiapensis* plantations at Tlatlauquitepec municipality. These plantations are located 19° 36' 24" N and 97° 14' 42" W at a mean altitude of 1900 m. The climate in the region is temperate-humid with abundant rain in summer, mean temperature of 15.6 °C and 1435 mm of mean annual rainfall.

Plots covered growth conditions, such as age (1 to 8 years), density and site quality. The dasometric information obtained from the sites was: dominant height (DH m) of 10 dominant and codominant trees, in order to optimize the proportionality and equivalence of sampling 100 trees ha⁻¹ on average (Alder, 1980); normal tree diameter with bark of all trees (Nd in cm) and number of live trees within sites (NT). Measured heights were assumed as a subsample of the population and were used to estimate the total height of each tree, using a height model based on the normal diameter (Nd). Set functions were: the Schumacher model (1) and the Chapman-Richards model for two parameters or mono-molecular model (2).

$$H = \alpha_0 e^{\left(\frac{-\alpha_1}{N_d}\right)} \quad (1)$$

$$H = \alpha_0 [1 - e^{(-\alpha_1 N_d)}] \quad (2)$$

where H is the total tree height in m, N_d is the diameter expressed in cm, and α_i are the estimated parameters.

To obtain standing volume, we used the equation for total bole volume with bark generated for this species. The equation is the result of the data analysis of 31 tree stem analyses, this equation contains three specific parameters and the following structure:

$$V = 0.000065 N_d^{1.630512} H^{1.15635} \quad (3)$$

where V is the volume with bark in m³, the rest was already defined.

$$H = \alpha_0 e^{\left(\frac{-\alpha_1}{D_n}\right)} \quad (1)$$

$$H = \alpha_0 [1 - e^{(-\alpha_1 D_n)}] \quad (2)$$

donde H es la altura total del árbol en m, D_n es el diámetro expresado en cm, α_i son los parámetros a estimar.

Para obtener el volumen del arbolado se utilizó la ecuación de volumen para fuste total con corteza generada para esta especie, que proviene de datos de análisis troncales de 31 árboles, la ecuación tiene tres parámetros específicos y la siguiente estructura:

$$V = 0.000065 D_n^{1.630512} H^{1.15635} \quad (3)$$

donde V es el volumen con corteza en m^3 , lo demás ya fue definido.

Con lo anterior se estimaron las variables de estado para caracterizar las condiciones de crecimiento por hectárea: altura promedio de los árboles dominantes (HD en m), área basal (AB en m^2), número de árboles vivos (NA) y volumen total (V en m^3).

El SCRM se formuló con ecuaciones de predicción y de proyección, para las variables de estado de la plantación. El primer paso para generar el SCRM fue ajustar los modelos de HD, el modelo que definió la familia de curvas de índice de sitio (IS, es la altura dominante del rodal a una edad base de referencia) tuvo la estructura $Y_2 = f(Y_1, E_2, E_1, \beta_i)$, donde Y_2 es el valor de la variable analizada del rodal a una E_2 (edad de proyección), Y_1 es la variable de interés medida a una edad E_1 (edad inicial), α_i son los parámetros de regresión (Clutter *et al.*, 1983; Diéguez *et al.*, 2005; Magaña *et al.*, 2008). Las hipótesis de crecimiento se presentan en el Cuadro 1.

La hipótesis de las curvas anamórficas es que las tasas de crecimiento entre sitios son constantes pero su potencialidad máxima (asíntota) varía. Por el contrario, la hipótesis de las curvas polimórficas se basa en que la tasa de crecimiento es variable en todos los sitios, pero la potencialidad máxima es común (asíntotas constantes) (Bailey y Clutter, 1974).

El paso siguiente fue ajustar los modelos de predicción y proyección en área basal, variable de importancia vital por su correlación alta con el volumen total, el cual mide de manera directa la densidad del rodal y permite evaluar el efecto de las prácticas silvícolas como los aclareos, los cuales pueden ser a nivel poblacional y en árboles individuales (Santiago *et al.*, 2013). Los modelos ajustados fueron los desarrollados por Torres y Magaña (2001), para el modelo de predicción (4) y proyección (5):

With the above, variables were estimated to characterize growth conditions per hectare: average height of dominant trees (DH in m), basal area (BA in m^2), number of living trees (NT) and total volume (V in m^3).

The TGYS was formulated with prediction equations and projection for the plantation state variables. The first step to generate the TGYS was set DH models, the model that defined the family of curves of the site index (SI, is the dominant height of the stand at a base reference age) had the structure: $Y_2 = f(Y_1, E_2, E_1, \beta_i)$, where Y_2 is the value of the analyzed variable of the stand to an E_2 (projection age), Y_1 is the variable of interest measured at E_1 age (starting age), β_i are the regression parameters (Clutter *et al.*, 1983; Diéguez *et al.*, 2005; Magaña *et al.*, 2008). Growth hypotheses are shown in Table 1.

The anamorphic curves hypothesis is that growth rates between sites are constant but their maximum potential (asymptote) varies. On the contrary, the polymorphic curves hypothesis is based on growth variability in all sites, and the maximum potential to be common (constant asymptotes) (Bailey and Clutter, 1974).

The next step was to fit the prediction models and projection in the basal area variable, which is of high importance for its correlation with the total volume, which directly measures the stand density and allow to evaluate the forestry practices effects, such as thinning, which can be, both, in population level and at individual trees (Santiago *et al.*, 2013). The fitted models were developed by Torres and Magaña (2001) for the prediction model (4) and projection (5):

$$AB_1 = e^{\left(\frac{-\beta_1}{E_1}\right)} DH_1^{\beta_2} \quad (4)$$

$$AB_2 = AB_1 \left(\frac{DH_2}{DH_1}\right)^{\beta_2} e^{\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}\right)\right)} \quad (5)$$

where AB_1 is the basal area in $m^2 ha^{-1}$ at age E_1 , AB_2 is the future basal area at E_2 , β_i are the parameters to be estimated; the rest were defined above.

Mortality by which the number of trees NT is defined is the most difficult variable to model in the TGYS because they are risk functions; still, they are modeled as continuous variables (De los Santos *et al.*, 2006). Mortality models are derived from change rates in the number of individuals, they assume that the change rate in the number of individuals over time is constant. To evaluate the NT, models with exponential structure were fitted, these were proposed by Torres and Magaña (2001) for the prediction model (6) and projection (7):

Cuadro 1. Estructuras de los modelos de altura dominante ajustados con diferencia algebraica.
Table 1. Dominant height models structure fitted by algebraic difference.

Nombre	Modelo de predicción	Modelo de proyección
Bass anamórfico	$HD_1 = \frac{\alpha_0 (1 - e^{-\alpha_1 E_1})}{1 + \alpha_2 e^{-\alpha_1 E_1}}$	$HD_2 = HD_1 \left(\frac{(1 - e^{-\alpha_1 E_2}) / (1 + \beta_2 e^{-\alpha_1 E_2})}{(1 - e^{-\alpha_1 E_1}) / (1 + \beta_2 e^{-\alpha_1 E_1})} \right)$
Schumacher anamórfico	$HD_1 = \alpha_0 e^{\left[-\alpha_1 \left(\frac{1}{E_1} \right) \right]}$	$HD_2 = HD_1 \left(\frac{e^{\alpha_1 / E_2}}{e^{\alpha_1 / E_1}} \right)$
Hossfeld IV polimórfico	$HD_1 = \frac{\alpha_0}{1 + e^{(\alpha_1) \times e^{\left[-\alpha_2 \ln(E_1) \right]}}}$	$HD_2 = \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{\alpha_0}{HD_1} - 1 \right) \times \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\alpha_2}}$
Weibull polimórfico	$HD_1 = \alpha_0 \left(1 - e^{-\alpha_1 E^{\alpha_2}} \right)$	$HD_2 = \alpha_0 \left[1 - \left(1 - \frac{HD_1}{\alpha_0} \right) \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\alpha_2} \right]$

HD_2 y HD_1 : altura dominante a la edad E_2 y E_1 , $\ln$: logaritmo natural, e : función exponencial y α_i : parámetros a estimar
 ❖ DH_2 and DH_1 : dominant height at E_2 and E_1 ages, $\ln$: natural logarithm, e : exponential function y α_i : parameters to be estimated.

$$AB_1 = e^{\left(\frac{-\beta_1}{E_1} \right)} HD_1^{\beta_2} \quad (4)$$

$$NA_1 = \delta_0 e^{(-\delta_1 E_1)} \quad (6)$$

$$AB_2 = AB_1 \left(\frac{HD_2}{HD_1} \right)^{\beta_2} e^{\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \right)} \quad (5)$$

$$NA_2 = NA_1 e^{[-\delta_1 (E_2 - E_1)]} \quad (7)$$

donde AB_1 es el área basal en $m^2 \text{ ha}^{-1}$ a la edad E_1 , AB_2 es el área basal futura a la E_2 , β_i son los parámetros a estimar, lo demás ya fue definido.

La mortalidad mediante la cual se determina el número de árboles NA, es la variable más complicada de modelar en el SCRM porque son funciones de riesgo, pero se modelan como variables continuas (De los Santos *et al.*, 2006). Los modelos de mortalidad se derivan de tasas de cambio en el número de individuos y el supuesto de ellos es que la tasa de cambio en el número de individuos a través del tiempo es constante. Para evaluar el NA se ajustaron modelos con estructura exponencial, propuestos por Torres y Magaña (2001), para el modelo de predicción (6) y proyección (7):

$$NA_1 = \delta_0 e^{(-\delta_1 E_1)} \quad (6)$$

$$NA_2 = NA_1 e^{[-\delta_1 (E_2 - E_1)]} \quad (7)$$

donde NA_1 es el número de árboles por hectárea en la edad inicial E_1 , NA_2 es el número de árboles a la edad de proyección E_2 , δ_1 es el parámetro a ser estimado.

where NA_1 is the number of trees per hectare in the initial age E_1 , NA_2 is the number of trees at the age of projection E_2 , δ_1 is the parameter to be estimated.

In order to predict the yield volume of the plantation at stand level, volume models proposed by Tamarit *et al.* (2013) were used. The most appropriate included: basal area, dominant height, age and number of trees, for the prediction (8) and projection (9) models:

$$V_1 = \gamma_0 AB_1^{\gamma_1} DH_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_1 / E_1)} \quad (8)$$

$$V_2 = V_1 \frac{AB_2^{\gamma_1} DH_2^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_2 / E_2)}}{AB_1^{\gamma_1} DH_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_1 / E_1)}} \quad (9)$$

where V_1 is the volume in $m^3 \text{ ha}^{-1}$ at age E_1 , V_2 is the volume per hectare at the projection age E_2 , γ_i model parameters to be estimated; the rest was already been defined.

With the variables that include the fitted models, the timber volume of the plantations was calculated. All TGYS elements were simultaneously fitted using the Seemingly Unrelated Regression technique (SUR) in the SAS/ETS® software (SAS

Para predecir el rendimiento en volumen de las plantaciones a nivel de rodal se usaron los modelos de volumen propuestos por Tamarit *et al.* (2013) y el más apropiado incluyó las variables área basal, altura dominante, edad y número de árboles, para el modelo de predicción (8) y proyección (9):

$$V_1 = \gamma_0 AB_1^{\gamma_1} HD_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA/E_1)} \quad (8)$$

$$V_2 = V_1 \frac{AB_2^{\gamma_1} HD_2^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_2/E_2)}}{AB_1^{\gamma_1} HD_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_1/E_1)}} \quad (9)$$

donde V_1 es el volumen en $m^3 ha^{-1}$ a la edad inicial E_1 , V_2 es el volumen por hectárea a la edad de proyección E_2 , γ_i parámetros a estimar del modelo; lo demás ya fue definido.

Con las variables que incluyen los modelos ajustados se calculó el volumen maderable de las plantaciones. Todos los elementos del SCRM se ajustaron simultáneamente mediante la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR) utilizando SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2008). Esta técnica permitió una mejor ganancia en la estimación de parámetros porque los componentes del error se correlacionaron en el sistema de ecuaciones (Rose y Lynch, 2001); además, permitió la compatibilidad total entre el modelo de estimación promedio (predicción) y el de proyección, de forma que los parámetros estimados adquirieron los mismos valores con el criterio de minimización de cuadrados de los residuos (Galán *et al.*, 2008).

Los criterios estadísticos de bondad de ajuste considerados al ajustar los modelos en HD fueron suma de cuadrados del error (SCE), cuadrado medio del error (CME), y coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ($R^2 Adj$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el mejor modelo de diámetro-altura ajustado se estimaron las alturas de los árboles restantes del sitio, lo cual permitió estimar el volumen puntual por árbol para construir el SCRM. Los resultados del ajuste indican que los dos modelos son buenos candidatos para realizar las estimaciones (Cuadro 2).

Los resultados muestran poca diferencia en el ajuste de los modelos. El modelo de Chapman Richards de dos parámetros presentó una ligera superioridad en los estadísticos de ajuste, por lo que se consideró el mejor modelo. Ambas ecuaciones generaron una asíntota cercana a 18 m.

Institute Inc., 2008). Besides, this technique allowed a better gain in the estimation parameters, because error components were correlated in the equations system (Rose and Lynch, 2001); this also allowed full compatibility between the model of average estimate (prediction) and the projection, in a way that the estimated parameters acquired the same values with the minimization of squared residuals criterion (Galán *et al.*, 2008).

The statistical goodness of fit criteria taken into account when fitting the models in DH were: the sum of squares error (SSE), the mean squared error (MSE), and the coefficient of determination adjusted to the number of parameters ($R^2 Adj$).

RESULTS AND DISCUSSION

Using the best fitted diameter-height model the heights of the remaining trees at the plot were estimated, which allowed estimating the precise volume per tree to build the TGYS. The results of the fitting indicated that the two models were good candidates for making estimates (Table 2). The values of the obtained results show little difference in the fit of the models.

Results show small difference for fitting the models. The two parameters Chapman-Richards model showed a slight superiority in the adjustment statistics, it is therefore considered the best model. Both equations generated an asymptote close to 18 m.

For the dominant height growth models, the statistical criteria for the goodness of fit equation system explained 88.2 % in the prediction and 94.9 % in the projection of the total observed variation in DH (Table 3).

Statistical tests values were similar in SSE, and MSE; additionally standard errors were reduced. This contrasts with the results of the study by Rodríguez *et al.* (2005) in even-aged forest stands of *P. chiapensis* in the states of Veracruz and Puebla, Mexico, in which fittings were made by using the algebraic difference approach with data obtained from stem analysis; fitted models accounted for 65.8 % to 98.3 % of the DH variation.

Pinus chiapensis is a fast growing species; therefore, the trend of the dataset has a sigmoidal shape, more vertical than other species and reaches its maximum development at an earlier age (Rodríguez *et al.*, 2005). As the age difference is reduced, the growth curves are more efficient. This indicates that if the prediction interval of the site index is small, the

Cuadro 2. Estadísticos obtenidos, parámetros estimados y significancia de los modelos de altura en función del diámetro normal.
Table 2. Obtained statistics, estimated parameters and significance of height models based on normal diameter.

Modelo	SCE	CME	R ² Adj	Parámetro	Estimación	E.E.	Significancia
Schumacher	1657.1	2.917	0.857	α_0	17.457	0.250	<0.001
				α_1	6.070	0.152	<0.001
Chapman Richards 2 parámetros	1320.2	2.328	0.885	α_0	17.802	0.560	<0.001
				α_1	0.069	0.004	<0.001

SCE: suma de cuadrados del error, CME: cuadrado medio del error, R²Adj: coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros; E.E: Error Estándar. ♦ SSE sum of squared error, MSE: mean square error, R²Adj: coefficient of determination adjusted for the number of parameters; EE: Standard Error.

Para los modelos de crecimiento en altura dominante, los criterios estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones explicaron 88.2 % en predicción y 94.9 % en proyección de la variación total observada en HD (Cuadro 3).

Los valores de los estadísticos fueron similares en SCE, y CME y, además, los errores estándar fueron reducidos. Esto contrasta con los resultados de un estudio realizado por Rodríguez *et al.* (2005) en rodales coetáneos de *P. chiapensis* en los estados de Veracruz y Puebla, en el cual hicieron ajustes al usar el método de diferencia algebraica con datos provenientes de análisis troncales; los modelos ajustados explicaron 65.8 % a 98.3 % de la variación para la HD.

Pinus chiapensis es una especie de crecimiento rápido; por tanto, la tendencia del conjunto de datos presenta una forma sigmoide más vertical que otras especies y alcanza su máximo desarrollo en una edad más temprana (Rodríguez *et al.*, 2005). En la medida en que la diferencia de edad es más pequeña, las curvas de crecimiento son más eficientes y esto solo indica que si el intervalo de predicción de índices de

changes in the form are more important than the changes in the general trend of the curve and *vice versa*. When the interval is large, the general trend of the curve has greater importance (Torres, 2001). In our study, the estimated parameters of the DH models were significant (Table 4).

The statistical analysis showed that the Hossfeld IV polymorphic model was the most appropriate because, besides presenting a high R²Adj in the prediction equations and projection, it generated low values in the SSE. In the parameter estimations, the maximum asymptote stands out at a height of 33 m, which is similar to the asymptotes of 31.53 m to 37.03 m identified by Rodríguez and Arteaga (2005). This is consistent with a study of the same species in El Rincón, Oaxaca, Mexico, which found that in pure forest stands the asymptotic relationship between height and age, in which a rapid initial growth is observed, occurs during the first 30 years (Sanchez and Del Castillo, 2001).

Based on the above and in the graphical evaluation of their behavior regard the trajectory of the data, the

Cuadro 3. Estadísticos obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante en función de la edad.

Table 3. Statistics obtained from the adjusted models in algebraic difference for dominant height in function of the age.

Modelo	Predicción			Proyección		
	SCE	CME	R ² Adj	SCE	CME	R ² Adj
Bass anamórfico	51.650	1.229	0.891	27.762	0.645	0.949
Schumacher anamórfico	59.769	1.406	0.882	34.530	0.793	0.938
Hossfeld IV polimórfico	51.413	1.145	0.891	27.762	0.645	0.949
Weibull polimórfico	54.674	1.301	0.891	53.009	1.232	0.903

sitio es pequeño, son más importantes los cambios en la forma que en la tendencia general de la curva y viceversa. Cuando el intervalo es grande, la tendencia general de la curva tiene una importancia mayor (Torres, 2001). En nuestro estudio, los parámetros estimados de los modelos de HD fueron significativos (Cuadro 4).

El análisis estadístico mostró que el modelo polimórfico de Hossfeld IV fue el más apropiado porque, además de presentar un R^2 Adj alto en las ecuaciones de predicción y proyección, generó valores bajos en la SCE. En la estimación de los parámetros resalta la asíntota máxima en altura estimada en 33 m, la cual es similar a las asíntotas de 31.53 m a 37.03 m identificadas por Rodríguez y Arteaga (2005). Esto concuerda con el estudio realizado con la misma especie en el Rincón, Oaxaca, y en rodales de masas puras la relación asintótica entre la altura y la edad, en la cual se observe un crecimiento inicial rápido, ocurre durante los primeros 30 años (Sánchez y Del Castillo, 2001).

Con base en lo anterior y con la evaluación gráfica de su comportamiento respecto a la trayectoria de los datos, se eligió el modelo de Hossfeld IV para la construcción de curvas de crecimiento en altura dominante (Figura 1).

Si se compara el crecimiento en altura dominante de estas plantaciones con el de bosques naturales de la misma especie, es evidente que las plantaciones

Hossfeld IV model was chosen for the construction of growth curves in dominant height (Figure 1).

If the dominant growth height in these plantations is compared with natural forests of the same species, it is evident that plantations have better SI, because forestry treatments such as pruning, weeding and light thinning are applied. In this case, at the average projected rate, reaches a height of 19 m in 12 years. In the study by Rodríguez and Arteaga (2005), in 12 years, trees did not reach a 10 m height.

Santiago *et al.* (2013) adjusted site index curves implementing the Hossfeld IV model in anamorphic form in even aged forest stands of *Pinus patula* Schl. *et* Cham. The found out that the most appropriate had constant growth rates with variable asymptotes. On the contrary, in our study, families with polymorphic curves are the most appropriate to describe the growth pattern of the plantation (Bailey and Clutter, 1974). The projections of the curves show that trees will continue to grow as time goes by, because the change from concave to convex is still not observed. For the variables that represent density and volume, the adjustment and estimated parameters show high accuracy, explaining 80.9 % in the mean prediction and 99.9 % in the variation of the projection (Table 5).

The high parameter significance (<0.001) and small standard errors denote the robustness and reliability of the proposed growth models (Table 6).

Cuadro 4. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante en función de la edad.

Table 4. Estimated parameters, standard error and significance of adjusted models in algebraic difference for dominant height in function of the age.

Modelo	Parámetro	Estimador	Error estándar	Significancia
Bass anamórfico	α_0	19.1453	1.770	<0.001
	α_1	0.3854	0.072	<0.001
	α_2	5.3658	1.775	0.004
Schumacher anamórfico	α_0	28.7514	1.448	<0.001
	α_1	5.5392	0.300	<0.001
Hossfeld IV polimórfico	α_0	33.2849	0.541	<0.001
	α_1	3.4135	0.158	<0.001
	α_2	1.5283	0.196	<0.001
Weibull Polimórfico	α_0	20.4770	1.983	<0.001
	α_1	0.0501	0.009	<0.001
	α_2	1.5433	0.154	<0.001

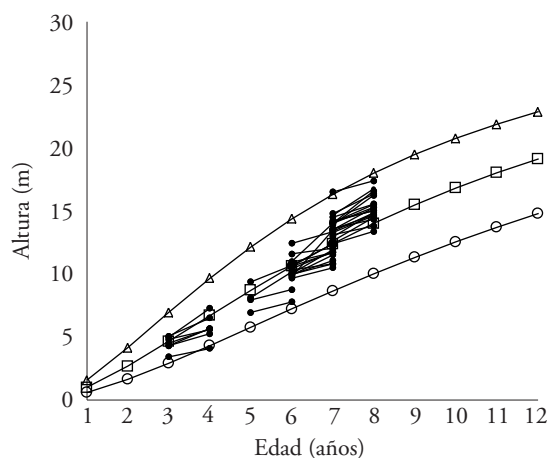


Figura 1. Comportamiento de las curvas polimórficas de índice de sitio (IS) para *P. chiapensis* a la edad base de 8 años sobrepuestas a los datos observados de altura dominante.

Figure 1. Behavior of polymorphic curves of site index (SI) for *P. chiapensis* at base age of 8 years superimposed on the observed data of dominant height.

tienen un mejor IS porque se aplican tratamientos silviculturales como podas, dehierbes y aclareos lijeros. En este caso el índice promedio proyectado alcanza una altura de 19 m a los 12 años. En el estudio realizado por Rodríguez y Arteaga (2005), a los 12 años el arbolado no alcanzó una altura de 10 m.

Santiago *et al.* (2013) ajustaron curvas de índice de sitio implementando el modelo de Hossfeld IV en la forma anamórfica en rodales coetáneos de *Pinus patula* Schl. *et* Cham. Ellos encontraron que las de crecimiento más apropiadas son constantes y con asíntotas variables. Por el contrario, en nuestro estudio, las familias de curvas polimórficas son las más adecuadas para describir el patrón de crecimiento de la plantación (Bailey y Clutter, 1974). Las proyecciones de las curvas muestran que los árboles seguirán creciendo al transcurrir el tiempo, porque todavía no se observa el cambio de cóncavas a convexas. Para las variables que representan la densidad y el volumen, el ajuste y los parámetros estimados muestran una precisión alta que explica 80.9 % en la predicción promedio y el 99.9 % de la variación en proyección (Cuadro 5).

La significancia alta de los parámetros (<0.001) y los errores estándar con valor bajo denotan la robustez y confiabilidad de los modelos de crecimiento propuestos (Cuadro 6).

El NA permite simular regímenes silviculturales para distintos IS. Sin embargo, si hay una falta de ajuste para predecir el número de árboles, tiene que ver con las edades jóvenes de la plantación porque a edades tempranas la mortalidad es poca. Al hacer el ajuste de forma simultánea, el modelo de proyección en NA da una estimación que explica 97.5 % de la variabilidad de ésta, con una estimación de mortalidad de 1.7 % anual.

The NT model allows to simulate forestry regimes for different SI. However, if there is a lack of fit to predict the number of trees, it has to do with young ages of the plantation, because at a young age the mortality is low. When simultaneously fitting, the projection model of NT gives an estimation that explains 97.5 % of this variability, with an estimated annual mortality of 1.7 %.

These models are consistent with that reported by Magaña *et al.* (2008), who proposed a mortality function for *Pinus rudis* Endl, in which the proportional mortality rate depends on the age and site index. To make yield forecasts, a minimum asymptotic value has to be defined, because the mortality model calculates to obtain zero trees ha^{-1} , but in a managed forest it is unlikely for this to happen (De los Santos *et al.*, 2006). The estimated values of the state variables of the stand condition in a future state from an initial state must be equal, regardless of the number of steps used in its prediction (Diéguez *et al.*, 2005).

Volume equations (models 8 and 9) incorporate the explanatory variables BA, DH, age and NT. Similarly, these variables are used to model the timber yield of: *Pinus arizonica* Engl. (Zepeda and Dominguez, 1998), *P. rudis* Endl. (De la Fuente *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 2008), *P. patula* Schiede (Valdez and Lynch, 2000), *P. montezumae* Lamb. (Zepeda and Acosta, 2000), *Cedrela odorata* L. and *Tabebuia donnellsmithii* Rose (Galán *et al.*, 2008).

The TGYS can represent in measurable terms the life of a stand through a yield table generated for the species, which shows the differences in the variables of interest as age changes (De los Santos *et al.*, 2006). Tables 7 and 8 show a yield table of *P. chiapensis* forest stands in the SI of 10, 14 and 18 m

Cuadro 5. Estadísticos de bondad de ajuste obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para área basal, mortalidad y volumen.**Table 5. Goodness-of-fit statistics obtained from the adjusted algebraic difference approach for basal area, mortality and volume.**

Modelo	Predicción			Proyección		
	SCE	CME	R ² Adj	SCE	CME	R ² Adj
Área basal	419.800	9.761	0.809	115.1	2.676	0.964
Mortalidad	102760	2329.700	0.078	26978.5	620.200	0.975
Volumen	18.5354	0.446	0.999	58.9	1.387	0.999

Cuadro 6. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos de predicción y proyección en área basal, mortalidad y volumen.**Table 6. Estimated parameters, standard error and significance of the prediction models and projection of basal area, mortality and volume.**

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Significancia
Área basal	β_1	5.664	0.5368	<0.0001
	β_2	1.386	0.0327	<0.0001
Mortalidad	δ_0	1072.034	35.3833	<0.0001
	δ_1	0.017	0.0050	<0.0001
	γ_0	2.103	0.1130	<0.0001
Volumen	γ_1	1.050	0.0070	<0.0001
	γ_2	0.3006	0.0230	<0.0001
	γ_3	-0.002	0.0010	<0.0001

Estos modelos concuerdan con el reportado por Magaña *et al.* (2008), quienes presentaron una función de mortalidad para *Pinus rudis* Endl, en la cual la tasa de mortalidad proporcional depende de la edad y el índice de sitio. Para hacer pronósticos de rendimiento se debe definir un valor asintótico mínimo porque el modelo de mortalidad calcula obtener cero árboles ha⁻¹, pero en un bosque manejado es difícil que esto ocurra (De los Santos *et al.*, 2006). Los valores estimados de las variables de estado del rodal a un instante futuro, a partir de un estado inicial deben ser iguales, independiente del número de pasos usados en su predicción (Diéguez *et al.*, 2005).

Las ecuaciones de volumen (modelos 8 y 9) incorporan las variables explicativas AB, HD, edad y NA. Similarmente, estas variables se usaron para modelar el rendimiento maderable de: *Pinus arizonica* Engl. (Zepeda y Domínguez, 1998), *P. rudis* Endl. (De la Fuente *et al.*, 1998; Magaña *et al.*,

of DH at a base age of 8 year. The yield table shows the expected growth of the stand variable of interest for each site quality and allows to distinguish several levels of CAI and MAI in volume, and thus define the age at which the absolute volume rotation CAI=IMA occurs.

The plantation is young and is still in growing stage. The carried out work, such as pruning, and thinning will greatly help to stimulate further growth.

Given that the selected DH model is of polymorphic type, growth rates are variable in the three site indexes (Figure 2).

The production potential of the sites is evident, the plantation is young and changes in absolute volume rotation are expected in short term; this is variable, it depends on the quality of the site and in the most productive sites, the rotation occurs at a younger age. By contrast, in the less productive sites, the rotation takes longer to happen. The fact that in sites of average productivity the technical

2008), *P. patula* Schiede (Valdez y Lynch, 2000), *P. montezumae* Lamb. (Zepeda y Acosta, 2000), *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Galán *et al.*, 2008).

El SCRM permite representar en términos cuantificables la vida de un rodal a través de una tabla de rendimiento generada para la especie, la cual muestra diferencias en las variables de interés a medida que varía su edad (De los Santos *et al.*, 2006). Los Cuadros 7 y 8 presentan una tabla de rendimiento para los rodales de *P. chiapensis* en los IS de 10, 14 y 18 m de HD a una edad base de 8 años. La tabla de rendimiento muestra el crecimiento esperado en las variables de interés para cada calidad de sitio, y permite distinguir varios niveles de ICA e IMA en volumen, y con ello definir la edad a la que ocurre el turno absoluto ICA=IMA.

volume rotation is estimated to be close to 20 years, suggests that the application of intensive forestry treatments such as weeding, fertilizing and pruning should be done before 20 years of age in order to promote the growth of a high economic value forest mass in the shortest possible time.

CONCLUSIONS

The developed Timber Growth and Yield System allows us to simulate forestry scenarios for the management of *Pinus chiapensis* forest stands, and may be used as a decision making tool.

Accurate predictions and projections of the stand's variables of interest are obtained with the TGYS. However, to validate long-term studies it is desirable to monitor the established of measurement

Cuadro 7. Predicción del crecimiento y rendimiento maderable para IS de 10 y 14 m, con una densidad inicial de 1200 árboles ha⁻¹.

Table 7. Growth and timber yield prediction for SI of 10 and 14 m, with an initial density of 1200 trees ha⁻¹.

Edad	NA	IS 10					IS 14				
		HD	AB	V	ICA	IMA	HD	AB	V	ICA	IMA
1	1200	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1180	1.63	0.12	0.22	0.22	0.11	2.67	0.23	0.53	0.53	0.27
3	1159	2.91	0.67	1.74	1.52	0.58	4.64	1.27	3.99	3.46	1.33
4	1140	4.31	1.84	5.86	4.12	1.47	6.69	3.38	12.81	8.82	3.20
5	1120	5.76	3.65	13.38	7.52	2.68	8.70	6.46	27.83	15.02	5.57
6	1101	7.21	6.02	24.51	11.13	4.09	10.61	10.26	48.63	20.80	8.10
7	1082	8.63	8.83	39.09	14.58	5.58	12.38	14.55	74.11	25.49	10.59
8	1064	10.00	11.98	56.69	17.60	7.09	14.00	19.09	103.02	28.91	12.88
9	1046	11.30	15.36	76.78	20.10	8.53	15.48	23.74	134.15	31.13	14.91
10	1028	12.53	18.87	98.83	22.04	9.88	16.82	28.36	166.48	32.33	16.65
11	1010	13.69	22.46	122.29	23.46	11.12	18.02	32.87	199.21	32.73	18.11
12	993	14.77	26.05	146.70	24.41	12.23	19.12	37.23	231.73	32.51	19.31
13	976	15.78	29.61	171.66	24.96	13.20	20.10	41.39	263.59	31.86	20.28
14	960	16.73	33.10	196.84	25.18	14.06	20.99	45.34	294.50	30.91	21.04
15	943	17.60	36.50	221.96	25.12	14.80	21.80	49.08	324.27	29.77	21.62
16	927	18.42	39.79	246.80	24.84	15.43	22.53	52.60	352.77	28.50	22.05
17	911	19.18	42.96	271.21	24.41	15.95	23.19	55.91	379.95	27.18	22.35
18	896	19.88	46.01	295.06	23.85	16.39	23.79	59.02	405.79	25.84	22.54
19	881	20.54	48.93	318.25	23.20	16.75	24.34	61.93	430.31	24.52	22.65
20	866	21.15	51.72	340.74	22.48	17.04	24.85	64.67	453.54	23.23	22.68
21	851	21.72	54.39	362.47	21.73	17.26	25.35	67.41	476.77	21.94	22.71
22	836	22.25	56.93	383.43	20.96	17.43	25.85	70.15	499.99	20.65	22.73
23	822	22.74	59.36	403.61	20.18	17.55	26.36	72.89	523.22	19.36	22.76
24	808	23.21	61.67	423.01	19.40	17.63	26.86	75.62	546.45	18.06	22.79
25	794	23.64	63.87	441.64	18.63	17.67	27.36	78.36	569.68	16.77	22.82

NA: número de árboles por hectárea; HD: altura dominante en m; IS: índice de sitio en m; AB: área basal en m² ha⁻¹; V: volumen en m³ ha⁻¹; ICA: incremento corriente anual en m³ ha⁻¹ año⁻¹; IMA: incremento medio anual en m³ ha⁻¹ año⁻¹ ♦ NT: number of trees per hectare; DH: dominant height in m; IS: site index in m; AB: basal area in m² ha⁻¹; V: volume in m³ ha⁻¹; CAI: current annual increment in m³ ha⁻¹ year⁻¹; MAI: mean annual increment in m³ ha⁻¹ year⁻¹.

Cuadro 8. Predicción del crecimiento y rendimiento maderable para IS de 18 m, con una densidad inicial de 1200 árboles ha^{-1} .

Table 8. Prediction of growth and timber yield for 18 m SI, with an initial density of 1200 trees ha^{-1} .

Edad	NA	IS 18				
		HD	AB	V	ICA	IMA
1	1200	1.56	0.01	0.01	0.01	0.01
2	1180	4.13	0.42	1.13	1.12	0.57
3	1159	6.93	2.21	8.05	6.92	2.68
4	1140	9.65	5.62	24.34	16.29	6.09
5	1120	12.14	10.25	49.96	25.62	9.99
6	1101	14.36	15.62	82.82	32.86	13.80
7	1082	16.30	21.32	120.36	37.53	17.19
8	1064	18.00	27.05	160.31	39.95	20.04
9	1046	19.47	32.64	200.97	40.66	22.33
10	1028	20.75	37.96	241.12	40.16	24.11
11	1010	21.87	42.98	280.01	38.88	25.46
12	993	22.85	47.66	317.15	37.14	26.43
13	976	23.70	52.01	352.31	35.16	27.10
14	960	24.46	56.03	385.39	33.08	27.53
15	943	25.12	59.75	416.39	31.00	27.76
16	927	25.72	63.18	445.36	28.97	27.83
17	911	26.24	66.36	472.39	27.04	27.79
18	896	26.72	69.29	497.61	25.21	27.64
19	881	27.14	72.00	521.12	23.51	27.43
20	866	27.52	74.52	543.05	21.93	27.15
21	851	27.87	76.85	563.53	20.47	26.83
22	836	28.19	79.02	582.65	19.12	26.48
23	822	28.47	81.04	600.53	17.88	26.11
24	808	28.73	82.92	617.27	16.74	25.72
25	794	28.97	84.67	632.95	15.68	25.32

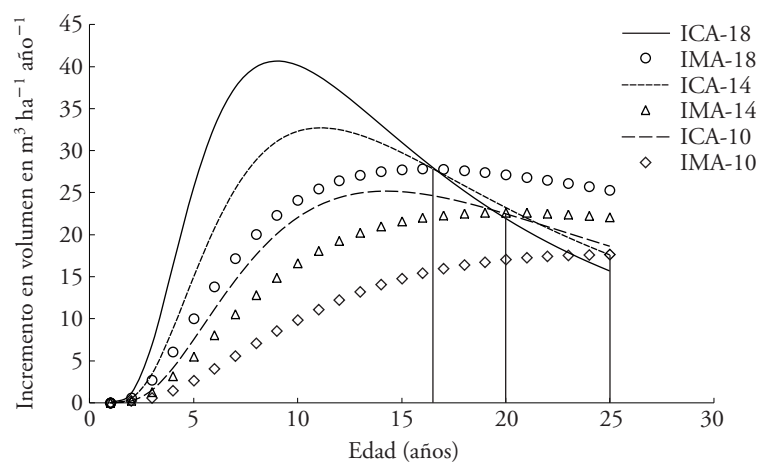


Figura 2. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual ICA) por índice de sitio, a una edad base de 8 años.

Figure 2. Mean annual increment curves (MAI) and current annual increment (CAI) by site index, at a base age of 8 years.

La plantación es joven y se encuentra en etapa de crecimiento. Las labores que se realicen, como podas, chapeos y aclareos ayudarán en gran parte a seguir estimulando el crecimiento de la misma.

Debido a que el modelo de HD seleccionado es de tipo polimórfico, las tasas de crecimiento son variables en los tres índices de sitio (Figura 2).

El potencial productivo de los sitios es evidente, la plantación es joven y se esperan turnos absolutos en tiempos cortos; éste es variable, depende de la calidad del sitio y en los más productivos el turno ocurre a menor edad. Por el contrario, en los sitios menos productivos, el turno tardará más tiempo en suceder. El hecho de que en los sitios de productividad promedio el turno técnico en volumen se es-time cercano a 20 años, sugiere que la aplicación de tratamientos silvícolas intensivos como limpias, fertilización y aclareos fuertes, se realice antes de dicha edad para promover el crecimiento de una masa de alto valor económico en el menor tiempo posible.

CONCLUSIONES

El SCRM desarrollado permite simular escenarios silvícolas para el manejo de rodales de *Pinus chiapensis*, y se puede utilizar en la toma de decisiones para la planeación de su manejo.

Con el SCRM se obtienen predicciones y proyecciones precisas de las variables de interés del rodal. Sin embargo, para validar los estudios a largo plazo es conveniente dar seguimiento a los sitios de medición establecidos, por lo cual los resultados presentados no deben extrapolarse más allá de 20 años.

El sistema sugiere la aplicación de aclareos fuertes antes de los 20 años para promover el crecimiento de una masa de alto valor económico en el menor tiempo posible y así acortar el turno absoluto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer de forma especial al Ing. Oscar Lemini y al responsable técnico, el Ing. Lauro Tonacatl Montes, por haber permitido realizar este estudio en su predio particular, por sus aportaciones, apoyo y disposición en todo momento.

LITERATURA CITADA

Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Estudio

plots, whereby the obtained results should not be extrapolated beyond 20 years.

The system suggests the application of strong clearings before 20 years to promote the growth of a mass of high economic value in the shortest possible time and thus shorten the absolute volume rotation.

—End of the English version—



- FAO. Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 118 p.
- Bailey, R. L., and J. L. Clutter. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20: 155-159.
- Borders, B. E., and R. L. Bailey. 1986. A compatible system of growth and yield equations for slash pine fitted with restricted three-stage least squares. *For. Sci.* 32: 185-201.
- Buckman, R. 1962. Growth and yield of red pine in Minnesota. USDA Forest Service, Tech. Bull. 1272. 50 p.
- Clutter, J. L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *For. Sci.* 9: 354-371.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- De la Fuente, E. A., A. Velásquez M., J. M. Torres R., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., y A. Trinidad S. 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. *Rev. Ciencia Forest. Mex.* 23: 3-8.
- De los Santos, P. H. M., M. Montero, y M. M. Kanninen. 2006. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonica* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia* 40: 521-532.
- Diéguez, A. U., F. Castedo D., y J. G. Álvarez G. 2005. Funciones de crecimiento en área basimétrica para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblaciones en Galicia. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.* 14: 253-266.
- Galán, L. R., H. M. De los Santos P., y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnelsmithii* Rose en San Jose Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 65-82.
- García, O. 1988. Growth modelling –a (re)view. *N. Z. For.* 33: 14-17.
- García, O. 1994. The state-space approach in growth modeling. *Can. J. For. Res.* 24: 1894-1903.
- Magaña, T. O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F., H. Aguirre D., y A. M. Fierros G. 2008. Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 5-19.
- Rodríguez, A. M., y B. Arteaga M. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. *Rev. Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 11: 39-44.
- Rose, Jr. C. E., and T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions. *For. Ecol. Manage.* 148: 51-61.

- Sánchez, V. N. M., y R. F. Del Castillo S. 2001. Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. Rev. Forest. Veracr. 3: 9-12.
- Santiago, G. W., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y G. Ramírez V. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. Rev. Fitotec. Mex. 36: 163-172
- SAS (Statistical Analysis System). 2008. SAS/STAT® 9.0 User's Guide. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. 248 p.
- Tamarit, U. J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete., J. R. Valdez L., H. Ramírez M., y V. Guerra de la C. 2013. Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. Agrociencia 48: 225-238.
- Torres, R. J. M. 2001. Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. Agrociencia 35: 87-98.
- Torres, R. J. M., y O. S. Magaña. 2001. Evaluación de Plantaciones Forestales. Limusa Noriega Editores. México, D. F. 472 p.
- Valdez, L. J. R., y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de pino patula en Puebla, México. Agrociencia 34: 747-758.
- Zepeda, B. E. M., y A. Domínguez P. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua. Madera y Bosques 4: 27-39.
- Zepeda, B. E. M., y M. Acosta M. 2000. Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. Madera y Bosques 6: 15-27.