ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata L.* y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca

Growth and wood yielding of *Cedrela odorata* l. and *Tabebuia donnell-smithii* Rose in San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca

Rolando Galán Larrea[1], Héctor Manuel de los Santos Posadas[2], y Juan Ignacio Valdez Hernández[2]

RESUMEN

Se construyó un Sistema de Crecimiento Maderable (SCM) de tipo explícito a partir de datos de sitios con remediciones de *Cedrela odorata* (cedro rojo) y *Tabebuia donnell-smithii* (primavera) en la región de la costa oaxaqueña. Como primera fase del SCM se construyeron modelos de volumen total y comercial por árbol con base en datos de volumen obtenidos mediante métodos no destructivos. Los datos de las parcelas se ajustaron a un SCM explícito, a través de regresión aparentemente no correlacionada para lograr compatibilidad total entre componentes de predicción y proyección.

PALABRAS CLAVE:
Diferencia algebraica, Índice de Sitio, Pochutla.

ABSTRACT

An explicit growth and yield system (GYS) was fitted to data from re-measured plots of *Cedrela odorata* (spanish cedar) and *Tabebuia donnell-smithii* planted at the Oaxaca's coastal region. As a first stage, a total and merchantable volume system at tree level was fitted based on non-destructive sampling scheme. Afterwards a GYS was fitted using seemingly unrelated regression to achieve full compatibility among prediction and projection models.

KEY WORDS:
Algebraic difference, Site Index, Pochutla.

INTRODUCCIÓN

A pesar de existir una serie de investigaciones encaminadas a generar nuevas técnicas para lograr un manejo óptimo de los recursos forestales, como los modelos de crecimiento y rendimiento, en México aún se tienen muchas carencias para el desarrollo, implementación y ejecución de estas herramientas, las cuales se han estudiado principalmente en especies arbóreas de bosques naturales en clima templado, como las coníferas.

1 Estudiante de Maestría, Posgrado Forestal (PF) Colegio de Posgraduados (COLPOS). ce: rgalan@colpos.mx
2 PF-COLPOS. CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Tel. (595) 9520200 ext 1484, Tel. D.F. (55) 58045900 ext 1484. ce: hmsantos@colpos.mx, ignaciov@colpos.mx

Para muchas especies arbóreas en los trópicos, no existe información científica previa acerca de su crecimiento y rendimiento, recurriendo comúnmente a estimaciones realizadas por los dueños del bosque. Esto lleva, a su vez, a una falta de información objetiva sobre el análisis beneficio/costo para la relación especie-sitio de plantación y, como consecuencia, a la inexistencia de un verdadero manejo en la mayoría de los bosques tropicales (Ricker y Del Río, 2004).

Las especies nativas de clima cálido en México, a pesar de su importancia económica y ecológica, carecen en su mayoría de información cuantitativa acerca de su crecimiento y desarrollo, básica para su manejo. Una alternativa para obtener dicha información es mediante el estudio de plantaciones establecidas, en las cuales se conoce la edad de las especies plantadas. En México, se han realizado algunos trabajos relativos a sistemas de crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Swietenia macrophylla* (García *et al*., 1998), y *Eucalyptus* sp. (Gómez *et al*., 2006; Reyes *et al*., 2006).

En la región de la costa de Oaxaca, fueron establecidas plantaciones forestales de enriquecimiento de acahual, con especies de alto valor comercial. Estas plantaciones siguen una distribución sistemática, regular y ordenada, en líneas, fajas o grupos dentro del bosque o acahual, y se consideran un método adecuado para regenerar bosques sobreexplotados donde la regeneración natural es insuficiente y se puede incrementar el volumen maderable con especies de alto valor comercial (Adjers *et al*., 1995; Montagnini *et al*., 1997). Sin embargo, actualmente no se cuenta con información sobre el crecimiento y rendimiento maderable de estas especies tropicales, sea en bosques naturales o en plantaciones.

OBJETIVO

El objetivo del estudio es el desarrollo de un sistema de medición del crecimiento y rendimiento maderable para las especies *Cedrela odorata* (cedro) y *Tabebuia donnell-smithii* (primavera) en la región, a partir de datos de diámetro y altura obtenidos de remediciones en sitios de muestreo permanentes en plantaciones de enriquecimiento de acahual. En una primera fase se determina un sistema de cubicación de volumen total del fuste para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose, mediante modelos matemáticos. Posteriormente, se construye un sistema de crecimiento y rendimiento maderable, a través de modelos de predicción explícita (totalidad de rodal) para volumen por hectárea, y se evalúa la productividad de las especies estudiadas mediante la elaboración de un índice de sitio basado en el crecimiento de altura dominante.

METODOLOGÍA

La presente investigación se llevó a cabo en plantaciones de enriquecimiento de acahual con edades comprendidas de tres a 10 años, en los predios: El Pén'-jamo, El Carnizuelo, Arroyo Rico y El Riego, ubicados en las inmediaciones del poblado San José Chacalapa, perteneciente al municipio de Pochutla, estado de Oaxaca.

El clima en el área de estudio, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García 1988, corresponde al grupo de climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano Aw_1: el intermedio entre Aw_0 y Aw_2, con una precipitación media anual de 934,7 mm y una temperatura media anual de 26°C (García, 1988). El suelo predominante en el área de estudio corresponde a un regosol éutrico (INEGI, 1995).

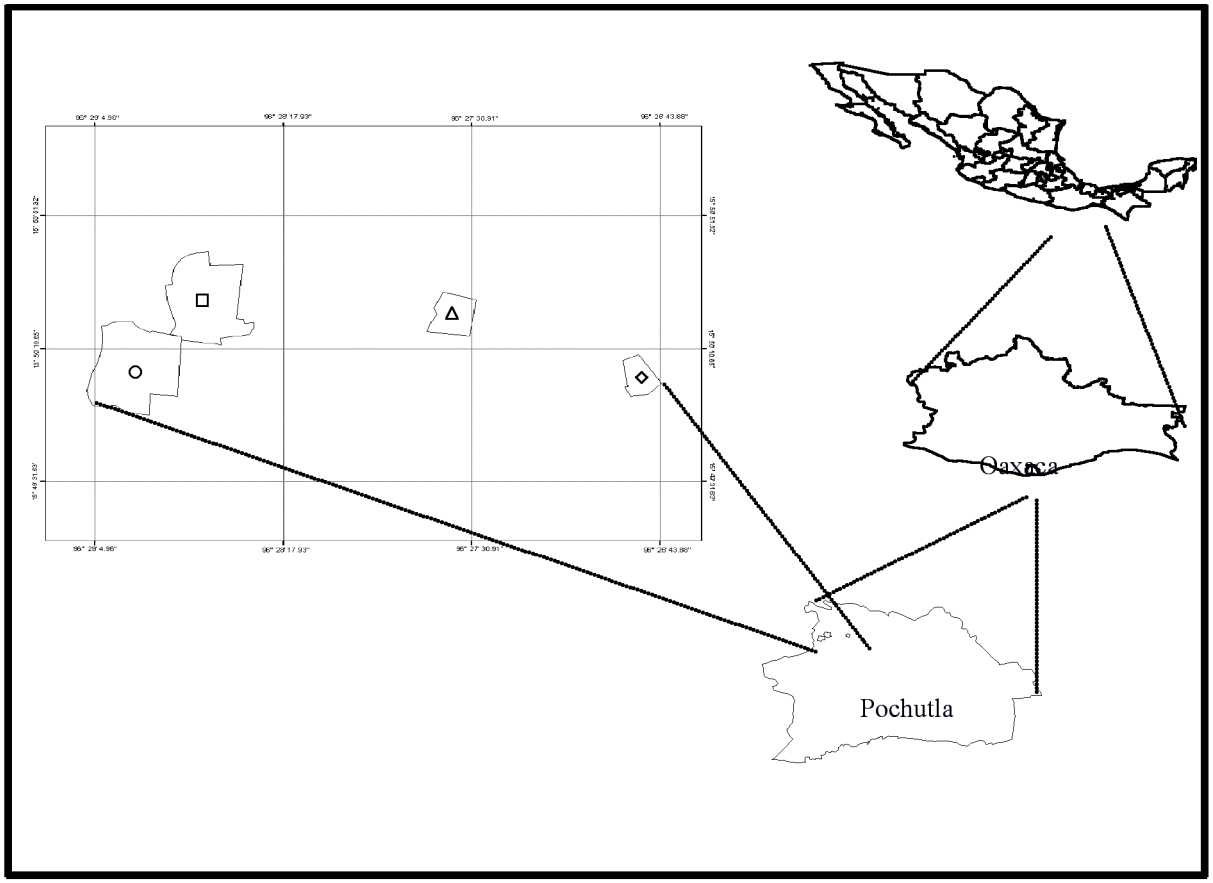

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio: “El Penjamo” (o), “El Carnizuelo” (□), “Arroyo Rico” (△) y “El Riego” (◇); San José Chacalapa, municipio de Pochutla, estado de Oaxaca.

Actualmente el tipo de vegetación, en tres de los cuatro predios (El Pénjamo, Carnizuelo y Arroyo Rico), corresponde a acahuales formados como consecuencia de la roza, tumba y quema. Sin embargo, con base en la clasificación de la vegetación de México realizada por Miranda y Hernández X. (1963), y tomando en cuenta las especies relicto, el tipo de vegetación fue una selva mediana caducifolia, aproximadamente tres cuartas partes de los árboles altos pierden completamente sus hojas en la época de sequía (Miranda y Hernández X., *op. cit.*).

Para el caso del predio El Riego, todavía se observa la estructura tanto vertical como horizontal de la selva mediana caducifolia, aunque de moderada a alta la perturbación; el dosel de las especies vegetales presentes es utilizado como sombra de cafetales.

Especies estudiadas

Son nativas de México e importantes por sus valores ecológicos y comerciales; son descritas a continuación con base en el trabajo realizado por Pennington y Sarukhán (1998).

Cedrela odorata L. (MELIACEAE)

Comúnmente se le conoce como cedro rojo, nombre aplicado en toda su área de distribución; aunque también es llamado como *chujté* (tzeltal) en la zona lacandona, Chiapas, así como *icte* (huasteco) y *tiocuáhuitl* (náhuatl). Este árbol puede llegar a medir hasta 35 m de altura y alcanzar un diámetro normal de 1,7 m, en ocasiones forma pequeños contrafuertes poco prominentes, sus ramas son ascendentes y gruesas, su copa es redonda y densa. Las hojas son dispuestas en espiral, paripinnadas o imparipinnadas, de 15 a 50 cm de largo incluyendo el pecíolo, compuestas por 10 a 22 folíolos opuestos o alternos, además poseen un penetrante olor a ajo cuando se estrujan. Los árboles de esta especie tiran las hojas cuando han madurado totalmente los frutos de la temporada anterior, antes de florecer.

Se encuentra en la vertiente del Golfo desde el sur de Tamaulipas y sureste de San Luis Potosí, hasta la península de Yucatán y en la del Pacífico desde Sinaloa hasta Guerrero, así como en la Depresión Central y costa de Chiapas. Alcanza sus máximos tamaños e incrementos en zonas con precipitaciones entre 2,500 y 4,000 mm anuales; en zonas con precipitación pluvial mucho menor, el árbol no se desarrolla tan bien y presenta fustes cortos y frecuentemente torcidos.

El cedro después de la caoba es la especie maderable más importante en la industria forestal de México. Su madera de características excelentes, se usa para obtener vigas, tablas y chapas, así como para fabricar diversos artículos torneados, cajas de puros y hacer tallas. El uso más indicado para esta especie, por el bello jaspeado de su madera, es la fabricación de chapas y madera terciada para exportación.

Tabebuia donnell-smithii Rose (BIGNONIACEAE)

Comúnmente se le conoce como primavera, en toda el área de distribución. Este árbol alcanza hasta 30 m de altura y un diámetro normal de 70 cm, con el tronco ligeramente acanalado; ramas ascendentes, copa alargada. Las hojas son decusadas digitado compuestas, de 20 a 70 cm de largo incluyendo pecíolo, compuestas de siete folíolos, ocasionalmente cinco. Las flores se presentan en panículas terminales, piramidales, con ramas cimosas de 15 a 35 cm de largo. El fruto es una cápsula de 25 a 50 cm de largo. Los árboles de esta especie pierden las hojas a fines de marzo, época

en que florecen, y las reponen a principios de mayo.

La especie se distribuye en la vertiente del Pacífico, desde Nayarit hasta Chiapas, y en la del Golfo en Tabasco, formando parte de las selvas medianas subcaducifolias en suelos de origen volcánico y metamórfico o sedimentario.

Su madera, de color claro, es muy apreciada para la fabricación de muebles.

Sitios permanentes de dimensiones fijas

En marzo del 2005 se establecieron 14 sitios permanentes de dimensiones fijas: 20 x 20 metros (400 m^2), los cuales se ubicaron en el terreno utilizando cintas métricas, brújula (Suunto), machetes para limpia de límites y estacas de madera, las cuales fueron marcadas con pintura vinílica. Los árboles ubicados dentro de los sitios fueron medidos en marzo del 2005 y remedidos al año siguiente (marzo del 2006). Cada árbol se identificó con pintura mediante un número secuenciado de control y se le registró su diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y edad con base en los registros existentes de la plantación, asegurándose que correspondieran al paraje de estudio; además, se obtuvieron datos como nombre del predio, número de sitio, especie, grado o porcentaje de inclinación de la pendiente, exposición de la pendiente y ubicación geográfica.

Cubicación de árboles en pie

Cedrela odorata se encuentra plantada en tres de los cuatro predios comprendidos para este estudio: El Pénjamo, El Carnizuelo y Arroyo Rico, en ellos se encontraron cinco, tres y dos categorías diamétricas de 5 cm, respectivamente; mientras que *Tabebuia donnell-smithii* solamente se encuentra establecida en el predio El Riego, con dos categorías diamétricas de 5 cm. Se seleccionaron ocho árboles por categoría diamétrica y en cada predio (Tabla 1).

Ante la falta de información referente a modelos de volumen de fuste para la zona, se midieron los diámetros normales con corteza, utilizando cinta diamétrica con un nivel de precisión de 3,14 mm (Forestry Suppliers, 1992), así como diámetros a diferentes alturas del fuste, iniciando en 0,30 cm y posteriormente cada metro. Los diámetros superiores fueron tomados de manera directa con ayuda de una escalera de madera de tres metros de alto, mientras que las alturas de fuste limpio y total del árbol se registraron con una baliza de madera graduada cada 50 cm.

Tabla 1. Número de árboles de *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* por categoría diamétrica, medidos en pie para obtener el sistema de cubicación.

	Categoría diamétrica					
	I	II	III	IV	V	Total
Especie	(2,5–7,5 cm)	(7,6–12,5 cm)	(12,6–17,5 cm)	(17,6–22,5 cm)	(22,6–27,5 cm)	Total
Cedrela odorata	24	24	16	8	8	80
Tabebuia donnell-smithii	8	8				16

La cubicación de árboles en pie es un procedimiento no destructivo, es decir, no es necesario derribar los árboles para cubicarlos, ya que se recurre a la medición de alturas parciales y de diámetros en aquellos puntos seleccionados como divisiones entre troza y troza (Romahn *et al*., 1994). Se escogió este método por tratarse de especies con alto valor comercial y representar una de las primeras plantaciones establecidas en la zona. El volumen del fuste se estimó a partir de la cubicación de cada una de las trozas o segmentos en los que se dividió el árbol, sumando al final todos los segmentos; para la cubicación de cada segmento (troza) y tanto para volumen total como volumen comercial, se utilizó la fórmula de Smalian (Romahn, *et al*., *op. cit.*).

Volumen total y comercial variable por árbol

Para obtener el volumen total con corteza, y tomando en cuenta la estructura de los datos, se empleó el modelo no lineal de Schumacher y Hall (1933), ajustando el modelo de volumen total a través de las variables diámetro y altura, mediante análisis de regresión usando el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, 2001). Este modelo es una formulación que permite expresar el volumen de varios sólidos de revolución como el cono, paraboloide, neiloide y cilindro (Fang y Bailey, 1999):

$$V_t = \alpha_0 \times D^{\alpha_1} \times H^{\alpha_2} \qquad (1)$$

Donde: V_t es el volumen total de fuste en m^3, D es el diámetro normal o a la altura del pecho (DAP) en cm, H es la altura en m, y son los parámetros a estimar.

Para obtener el volumen comercial se ajustaron tres modelos matemáticos: Clutter, 1980 (2); Fang y Bailey, 1999 (3) y Piennar y Reheney, 1988 (4), los cuales involucran la estimación simultánea del volumen total y comercial variable. Estos modelos de volumen comercial ajustan simultáneamente con el modelo de volumen total de Schumacher y Hall que implica un modelo de ahusamiento.

$$V_c = V_t \times \left(1 - \beta_0 \times \frac{d^{\beta_1}}{D^{\beta_2}}\right) \qquad (2)$$

$$V_c = V_t - \beta_0 \times d^2 \times (H - h) \qquad (3)$$

$$V_c = V_t - \beta_0 \times \left(\frac{d^{\beta_1}}{D^{\beta_1 - 2}}\right) \times (H - 1.3) \qquad (4)$$

Donde V_c es el volumen comercial variable en m^3, d es el diámetro en cm de punta comercial a la altura que h que es la altura comercial en m a partir del tocón; β_0, β_1 y β_2 corresponden a los parámetros a estimar para la punta no comercial, las demás variables fueron definidas en el modelo 1.

La elección del modelo que presentó mejor ajuste fue basada en los criterios tomados de Rentería (1995): alto valor de R^2 o pseudo R^2 (cercano a 1), valor bajo del Cuadrado Medio del Error, parsimonia y significancia estadística de los parámetros estimados.

Estimación de alturas

Para obtener la cubicación por sitio de muestreo es necesario medir el diámetro y altura total de todos los árboles presentes. Por razones de costo

y tiempo, así como en ocasiones por condiciones del terreno: alta inclinación de la pendiente, cárcavas y vegetación competidora (p. ej. malezas), esta medición frecuentemente no se realiza.

Ante tal situación, la altura total de una submuestra es utilizada en modelos de regresión para estimar las alturas del resto de la población en función del diámetro normal. La relación existente entre estas dos variables es muy estrecha, generalmente las alturas aumentan con el diámetro, sin embargo, llega un momento en que la altura se mantiene constante y el diámetro continua aumentando (García, 1995). En el presente estudio, durante la primera medición (marzo del 2005) fueron tomadas solamente las alturas de los árboles más altos (dominantes), estimando las alturas de aquellos árboles no medidos a través del siguiente modelo:

$$\hat{H} = \varphi_0 \times D^{\varphi_1} \qquad (5)$$

Donde: φ_0 y φ_1 son los parámetros a estimar.

Sistema de rendimiento maderable

Los modelos de predicción explícita han sido ampliamente usados por su sencillez y precisión, requiriendo información básica como diámetro (DAP) y altura para su construcción. Tienen la desventaja de proporcionar información muy general de la plantación de interés; sin embargo, algunas modificaciones y ampliaciones de estos modelos pueden usarse para proporcionar información más detallada de la misma (Torres y Magaña, 2001). Por lo anterior, y considerando que en la región no se cuenta con información básica de estas especies, se utilizaron modelos de predicción explícita para construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM), el cual permitirá generar datos acerca de la dinámica del crecimiento en volumen de la plantación y como base para trabajos posteriores.

Crecimiento en altura dominante

A la altura dominante evaluada a una edad de referencia se le denomina Índice de Sitio (IS), y es el método directo más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Clutter *et al*., 1983; Zepeda y Rivero, 1984).

Para la construcción de las curvas de índice de sitio se utilizaron datos de altura y edad de árboles dominantes y codominantes en 14 sitios permanentes de muestreo, ubicados de tal modo que cubrieran los intervalos de edad (3–10 años) y calidad de sitio. Primeramente se ajustó el modelo de la curva guía y posteriormente se seleccionaron dos modelos a través de la estrategia denominada Método de la Diferencia Algebraica, finalmente se ajustaron simultáneamente los modelos de predicción y proyección, generando una familia de curvas de IS de tipo anamórficas: la altura guarda la misma proporción a diferentes edades, haciendo que las curvas aparenten tener la misma forma (Clutter *et al*., 1983).

Para la elaboración de estas curvas de índice de sitio, mediante el método de mínimos cuadrados, se ajustaron los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, por ser sencillos y muy utilizados al modelar altura dominante y construir este tipo de curvas (Ramírez, 1981); además, mostraron buenos resultados de ajuste para modelar la altura dominante en *Swietenia macrophylla* mediante análisis de regresión (García *et al*., 1998). La selección del modelo más adecuado para describir la relación altura

dominante–edad se hizo mediante los criterios de pseudo R^2, cuadrado medio del error (CME), valor de F, intervalos de confianza y error estándar de los estimadores.

Las expresiones matemáticas, para los modelos promedio (6) y diferencia algebraica (7) muestran una familia de curvas anamórficas tipo Schumacher usada para estimar el IS y la proyección de alturas en las plantaciones:

$$A_1 = \delta_0 \times \exp\left(-\frac{\delta_1}{\mathrm{E}}\right) \qquad (6)$$

$$A_2 = A_1 \times \frac{\exp\left(\frac{-\delta_1}{E_2}\right)}{\exp\left(\frac{-\delta_1}{E_1}\right)} \qquad (7)$$

Las expresiones para los modelos promedio (8) y diferencia algebraica (9) muestran una familia de curvas anamórficas tipo Chapman-Richards empleada para estimar el IS y la proyección de alturas en las plantaciones:

$$A_1 = \delta_0 \times \left(1 - \exp\left(-\delta_1 \times E\right)\right)^{\delta_2} \qquad (8)$$

$$A_2 = A_1 \times \left(\frac{1 - \exp\left(-\delta_1 \times E_2\right)}{1 - \exp\left(-\delta_1 \times E_1\right)}\right)^{\delta_2} \qquad (9)$$

Donde: A_1 es la altura dominante inicial en metros; A_2 es la altura dominante a proyectar en metros; E es la edad en años; E_1 es la edad inicial, E_2 es la edad de proyección; δ_0, δ_1 y δ_2 son los parámetros a estimar.

En el presente estudio se seleccionaron curvas de tipo anamórficas por presentar los mejores ajustes estadísticos y las mejores representaciones gráficas del crecimiento de las especies en los índices de sitio definidos.

Crecimiento en área basal

El área basal es una medida directa de la densidad que involucra tanto el número de individuos como el tamaño de éstos, y es, quizá, la variable más utilizada para modelar el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado, tanto a nivel poblacional como individual.

Para obtener el área basal actual se utilizó el siguiente modelo no lineal (Torres y Magaña, 2001):

$$AB_1 = \exp\left(\frac{-\phi_1}{E_1}\right) \times \mathrm{A}_1^{\phi_2} \qquad (10)$$

La proyección del área basal se realizó con el siguiente modelo:

$$AB_2 = AB_1 \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\phi_2} \times \exp\left(\frac{-\phi_1}{E_2} + \frac{\phi_1}{E_1}\right) \qquad (11)$$

Donde AB_1 y A_1 corresponden al área basal y altura dominante, respectivamente, a la edad inicial E_1 (edad de referencia); AB_2 y A_2 son área basal y altura dominante, respectivamente, a la edad E_2 (edad de proyección); y ϕ_1 y ϕ^2 son los parámetros a estimar del modelo.

Modelo de volumen total

Para predecir y obtener el volumen total actual se empleó el siguiente modelo que utiliza el área basal y la edad:

$$V_1 = \gamma_0 \times AB_1^{\gamma_2} \times \exp\left(-\gamma_1 / E_1\right) \qquad (12)$$

También fue posible proyectar el volumen a través del modelo siguiente:

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_2} \times \exp\left(\frac{-\gamma_1}{E_2} + \frac{\gamma_1}{E_1}\right) \quad (13)$$

Donde V_1 y AB_1 son el volumen y área basal, respectivamente, a la edad inicial E_1 (edad de referencia); V_2 y AB_2 corresponden al volumen y área basal, respectivamente, a la edad E_2 (edad de proyección); y γ_0, γ_1 y γ_2 son los parámetros a estimar.

Método de ajuste del SCRM

Antes de ajustar el sistema de crecimiento y rendimiento maderable, se partió del ajuste de modelos promedio para obtener buenos estimadores iniciales de los parámetros; posteriormente, se ajustaron los modelos promedio y de proyección como un sistema de ecuaciones bajo la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR por sus siglas en inglés) (Borders, 1989).

La técnica de estimación de parámetros SUR proporciona una mejor ganancia en la estimación de parámetros cuando los componentes del error se correlacionan para un sistema de ecuaciones (Rose y Lynch, 2001); además permite compatibilidad total entre el modelo de estimación promedio y el de proyección, de forma que los parámetros estimados son los mismos mientras se cumple con el criterio de minimización de cuadrados.

RESULTADOS

Modelos para volumen total y comercial

En la tabla 2 se observan las estadísticas de ajuste y parámetros estimados para el modelo de volumen total sugerido por Schumacher y Hall (1933), con datos de remediciones en sitios permanentes de muestreo; el modelo presentó un ajuste significativo ($p < 0.0001$) y valores altos de R^2.

Al ajustar simultáneamente los modelos de volumen comercial con el modelo de volumen total se obtuvieron los valores de los estimadores que se muestran en la tabla 3. El ajuste sugiere que el modelo de Fang y Bailey (1999) es el más adecuado para estimar el volumen comercial y total, con una mayor R^2 y menores valores en la suma de cuadrados del error (SCE), aunque el valor del cuadrado medio del error (CME) obtenido en este modelo es igual al del modelo de Clutter (1980); sin embargo, se toma el modelo de Fang y Bailey por ser más sencillo en su estructura y con sólo cuatro parámetros a estimar.

Tabla 2. Resultados del ajuste para el modelo de volumen total por mínimos cuadrados.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados de α_i	Error estándar	Prob>T
1	0,9946	0,00173	0,000022	α_0	0,000032	3,31E-06	<,0001
				α_1	1,942372	0,054	<,0001
				α_2	0,911162	0,058	<,0001

Tabla 3. Resultados del ajuste para los modelos de volumen comercial por mínimos cuadrados.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados	Error Estándar	Prob>T
				α_0	0,000039	2,49E-06	<,0001
				α_1	2,204731	0,0296	<,0001
2	0,9814	0,0244	0,000025	α_2	0,546288	0,0302	<,0001
				β_0	0,35699	0,0223	<,0001
				β_1	2,199037	0,0304	<,0001
				β_2	-1,94498	0,0331	<,0001
				α_0	0,000036	1,17E-06	<,0001
3	0,9817	0,0241	0,000025	α_1	1,947527	0,0164	<,0001
				α_2	0,825099	0,0174	<,0001
				β_0	0,000016	1,13E-07	<,0001
				α_0	0,000037	1,09E-06	<,0001
				α_1	1,975793	0,0148	<,0001
4	0,9809	0,0251	0,000026	α_2	0,832565	0,0157	<,0001
				β_0	0,000019	1,70E-07	<,0001
				β_1	2,185891	0,0303	<,0001

Durante el proceso de ajuste de los modelos para volumen total y comercial no se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre *C. odorata* y *T. donnell-smithii*, por lo que se tiene un solo modelo para ambas especies.

Crecimiento en altura dominante

El modelo Chapman-Richards presentó el mejor ajuste para predecir y explicar el crecimiento en altura de *C. odorata* y *T. donnell-smithii* (Tabla 4), obteniendo el mayor valor de Pseudo- R^2, así como los valores más pequeños en la suma de cuadrados del error (SCE) y en el cuadrado medio del error (CME).

Al parámetro δ_1 en el modelo (8) de Chapman-Richards le fue asignado un valor constante probando entre valores positivos menores de 1, y se observó que el valor de 0.08 fue el que mejor contribución tuvo al ajuste del modelo. Con el ajuste del modelo de Chapman-Richards se generaron familias de curvas anamórficas de IS para 14, 18, 22 y 26 m a una edad base de 10 años (Figura 2).

El modelo de Chapman-Richards tiende a subestimar el crecimiento en sitios de menor calidad (IS= 14) para edades tempranas y lo sobreestima en sitios de mejor calidad tanto para edades tempranas como posteriores (IS= 26) (Figura 2). Sin embargo, estas curvas muestran que las especies estudiadas aún están en la fase acelerada de crecimiento en altura.

Tabla 4. Resumen del análisis de regresión efectuado con datos de altura–edad en Cedrela odorata y Tabebuia donnell-smithii para conocer el nivel de ajuste de los modelos empleados.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados de δ_i	Error Estándar	Prob>T
(6)	0,8707	21,8289	1,7463	δ_0	21,4092	1,5001	<,0001
				δ_1	3,923788	0,3478	<,0001
(8)	0,919	17,2047	1,3764	δ_0	29,6996	2,3474	<,0001
				δ_1	0,08	-	-
				δ_2	1,241143	0,09	<,0001

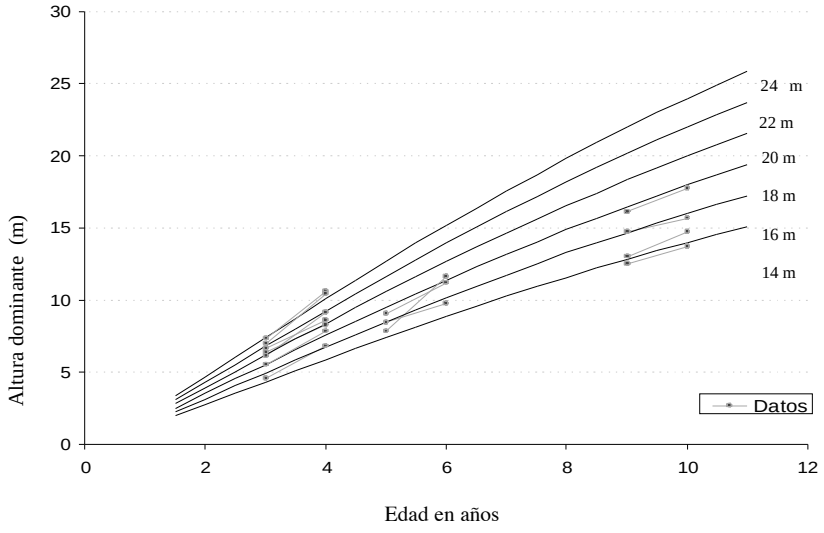

Figura 2. Curvas anamórficas de índice de sitio para *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* (edad base= 10 años) en plantaciones de enriquecimiento San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

La predicción del crecimiento en altura dominante no presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre las especies estudiadas, por lo que las curvas de índice de sitio pueden ser utilizadas indistintamente para *C. odorata* y *T. donnell-smithii*. Sin embargo, gráficamente esta última especie muestra ligeramente un mejor índice de sitio a edades tempranas (IS= 26).

Ajuste del SCRM

Una vez definida la familia de curvas para altura dominante (*A*) se decidió realizar el ajuste simultáneo de ésta, así como del área basal (*AB*) y volumen (*V*) bajo la técnica SUR (Tabla 5), la cual mostró un mejor ajuste en comparación con los mínimos cuadrados ordinarios; los modelos de proyección presentaron una alta R^2, así como valores bajos de la SCE y del CME respecto a los modelos de predicción (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros estimados y bondad de ajuste bajo regresión aparentemente no correlacionada (SUR), para los modelos de altura dominante (*A*), área basal (*AB*), y volumen total (*V*).

Modelo	Elemento	G.L. modelo	G.L. error	SCE	CME	R^2	R^2-ajustada
8	A_1	1,5	12,5	17,0802	1,3664	0,8961	0,8920
9	A_2	0,5	13,5	12,3438	0,9144	0,9173	0,9204
10	AB_1	1	13	11,8424	0,911	0,8767	0,8767
11	AB_2	1	13	7,0121	0,5394	0,9484	0,9484
12	V_1	2	12	9,021	0,7517	0,9926	0,9919
13	V_2	1	13	7,0558	0,5428	0,9968	0,9968

Parámetro	Valor Estimado SUR	Error Estándar Aproximado SUR	Valor de t SUR	Valor de Rechazo SUR
δ_0	29,64687	2,1303	13,92	<,0001
δ_2	1,227985	0,0852	14,41	<,0001
$ø_0$	5,233294	0,5179	10,11	<,0001
$ø_1$	0,988604	0,0284	34,76	<,0001
γ_0	1,986471	0,2116	9,39	<,0001
γ_1	1,105139	0,3638	3,04	0,0103
γ_2	1,293258	0,0346	37,38	<,0001

Tabla 6. Edad, altura dominante, área basal, volumen total, incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) para cuatro índices de sitio (IS) en plantaciones de *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell–smithii* en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Altura dominante por IS (m edad base10 años)				**Área basal por IS (m^2 ha^{-1})**				**Volumen por IS (m^3 ha^{-1})**				**IMA volumen por IS (m^3 ha^{-1} $año^{-1}$)**				**ICA volumen por IS (m^3 ha^{-1} $año^{-1}$)**			
14	**18**	**22**	**26**	**14**	**18**	**22**	**26**	**14**	**18**	**22**	**26**	**14**	**18**	**22**	**26**	**14**	**18**	**22**	**26**
2,7	3,5	4,3	5,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
4,3	5,5	6,8	8,0	0,9	1,1	1,4	1,6	1,2	1,6	2,1	2,6	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	1,3	1,7	2,1
5,9	7,6	9,2	10,9	1,8	2,2	2,7	3,2	3,1	4,3	5,5	6,7	0,5	0,7	0,9	1,1	1,9	2,6	3,4	4,2
7,4	9,5	11,6	13,8	2,8	3,5	4,2	5,0	5,9	8,0	10,3	12,7	0,8	1,1	1,4	1,7	2,8	3,8	4,8	5,9
8,9	11,4	13,9	16,5	3,8	4,8	5,9	6,9	9,3	12,7	16,2	20,0	1,0	1,4	1,8	2,2	3,4	4,6	5,9	7,3
10,3	13,2	16,1	19,1	4,9	6,2	7,5	8,8	13,1	17,9	22,9	28,2	1,3	1,7	2,2	2,7	3,8	5,2	6,7	8,2
11,6	14,9	18,2	21,5	5,9	7,5	9,1	10,7	17,2	23,5	30,1	37,0	1,5	2,0	2,6	3,2	4,1	5,6	7,2	8,8
12,8	16,5	20,2	23,8	6,9	8,8	10,7	12,5	21,5	29,4	37,6	46,2	1,7	2,3	2,9	3,6	4,3	5,9	7,5	9,2
14,0	18,0	22,0	26,0	7,9	10,1	12,2	14,3	25,9	35,3	45,3	55,6	1,8	2,5	3,2	4,0	4,4	6,0	7,6	9,4
15,1	19,4	23,7	28,0	8,9	11,3	13,7	16,0	30,3	41,3	52,9	65,0	2,0	2,7	3,5	4,3	4,4	6,0	7,7	9,4
16,1	20,7	25,3	29,9	9,8	12,4	15,1	17,7	34,6	47,2	60,5	74,3	2,1	2,9	3,8	4,6	4,3	5,9	7,6	9,3
17,1	22,0	27	31,7	10,6	13,5	16,4	19,2	38,9	53,0	67,9	83,5	2,3	3,1	4,0	4,9	4,2	5,8	7,4	9,1
18,0	23,1	28	33,4	11,5	14,6	17,6	20,7	43,0	58,6	75,1	92,4	2,4	3,3	4,2	5,1	4,1	5,6	7,2	8,9
18,8	24,2	30	34,9	12,2	15,5	18,8	22,1	47,0	64,1	82,1	101,0	2,5	3,4	4,4	5,4	4,0	5,5	7,0	8,6

La tabla 6 presenta la producción para las especies estudiadas a densidades iniciales variables entre los sitios de muestreo; en ella se representan, las alturas dominantes, así como el área basal y volumen por hectárea, además del incremento medio anual y corriente anual por hectárea por año a diferentes índices de sitio (Tabla 6).

El crecimiento en volumen y área basal continúa de forma ascendente (Figura 3), situación similar muestran las curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) en volumen (Figura 4). Es lógico pensar que debido a las edades jóvenes en las que se evaluaron las plantaciones, éstas todavía se encuentran en una etapa de crecimiento casi exponencial. Remediciones de estas parcelas sin duda arrojarán información muy valiosa sobre la duración de este comportamiento.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo Schumacher y Hall (1933) empleado para definir el sistema de cubicación y obtener el volumen total por árbol en este estudio, fue utilizado por Reyes *et al*. (2006), para dos especies de Eucalipto plantadas comercialmente en Tehuantepec, Oaxaca, México, también por Ferreira *et al.* (2004) al emplear varios modelos matemáticos para obtener el volumen de *Tabebuia cassinoides* en São Paulo, Brasil y por Akindele y LeMay (2006), para un grupo de 77 especies de árboles tropicales, en Nigeria, aunque en especies y sitios diferentes, el modelo fue el que mejor se ajustó a los datos.

Los resultados obtenidos en este trabajo difieren de los reportados por Bravo *et al*. (2007), quienes al desarrollar un sistema de crecimiento y rendimiento para caoba y cedro en plantaciones de Tuxtepec, Oaxaca, emplearon los modelos de volumen total y comercial de Clutter (1980) y Piennar y Rheney (1988), así como el modelo de crecimiento en altura dominante de Schumacher. Mientras que en este trabajo estos modelos no presentaron los mejores indicadores de ajuste y estas diferencias posiblemente se deban al origen de los datos.

Las plantaciones evaluadas en Tuxtepec, aunque de similar edad, no son de enriquecimiento de acahuales, sino plantaciones bajo silvicultura intensiva y bajo la mezcla cedro rojo-caoba.

La representación gráfica del modelo Chapman-Richards en su versión anamórfica, para los datos en este estudio, difiere de lo reportado por García *et al*. (1998), quienes desarrollaron ecuaciones de índice de sitio para *Swietenia macrophylla* King, en plantaciones en Quintana Roo, México, reportando que el modelo Chapman-Richards sobreestima el crecimiento para edades tempranas y lo subestima al final, esto es posible considerando las especies, sus hábitos de crecimiento y las edades de las plantaciones, además esto es lo esperado dado que los árboles aún están en la fase acelerada de crecimiento. Sin embargo, en las mejores calidades de sitio se tiende a sobrestimar la altura; pero no es tan conservadora como el modelo de Schumacher, el cual tiende a subestimar la altura dominante en los mejores índices de sitio.

El sistema de crecimiento y rendimiento maderable desarrollado puede ser usado indistintamente para las dos especies plantadas (*Cedrela odorata, Tabebuia donnell-smithii*) y es una herramienta útil para la toma de decisiones en la planeación de su manejo futuro.

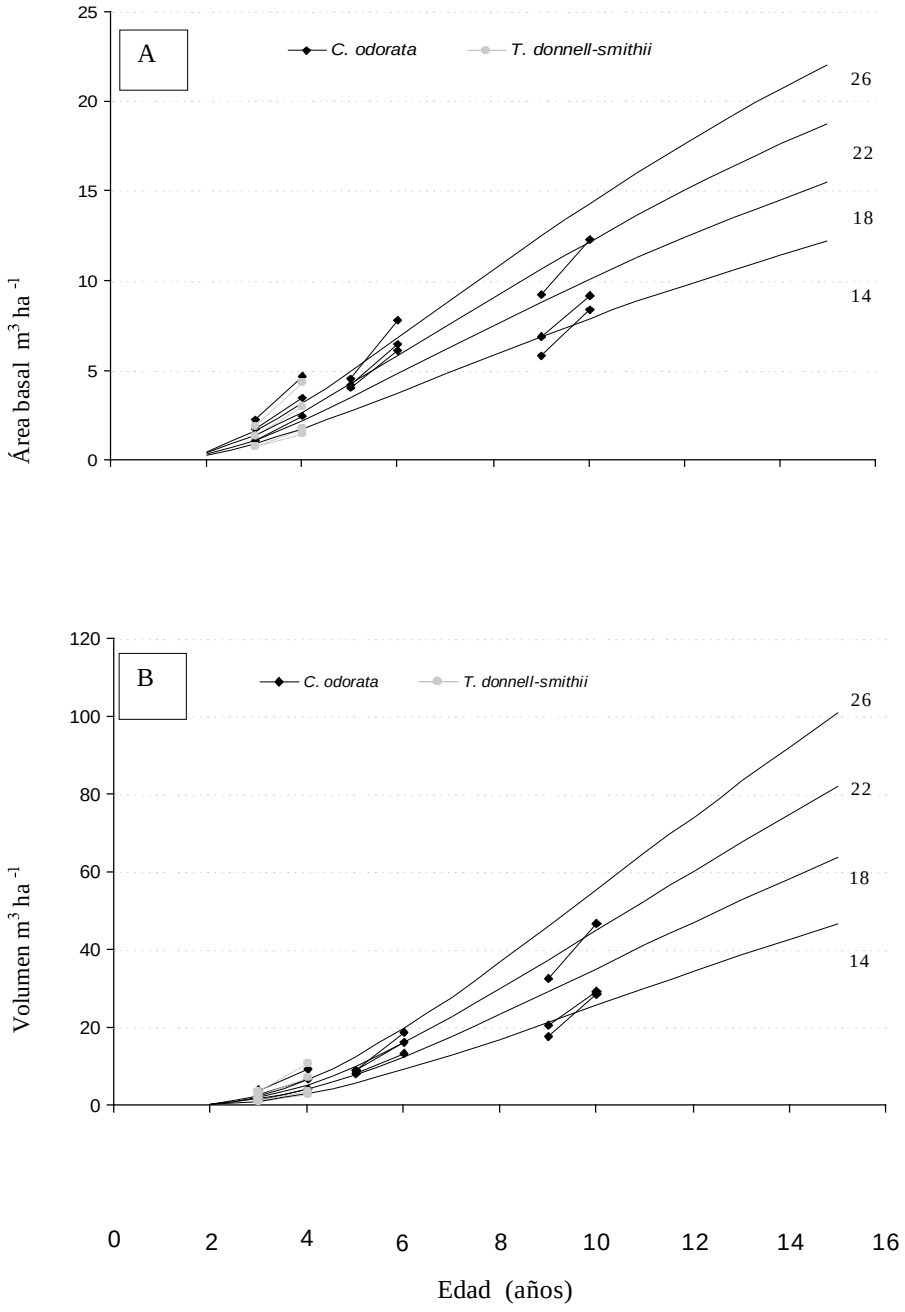

Figura 3. Datos de área basal (A) y volumen (B), por índice de sitio, a una edad base de 10 años.

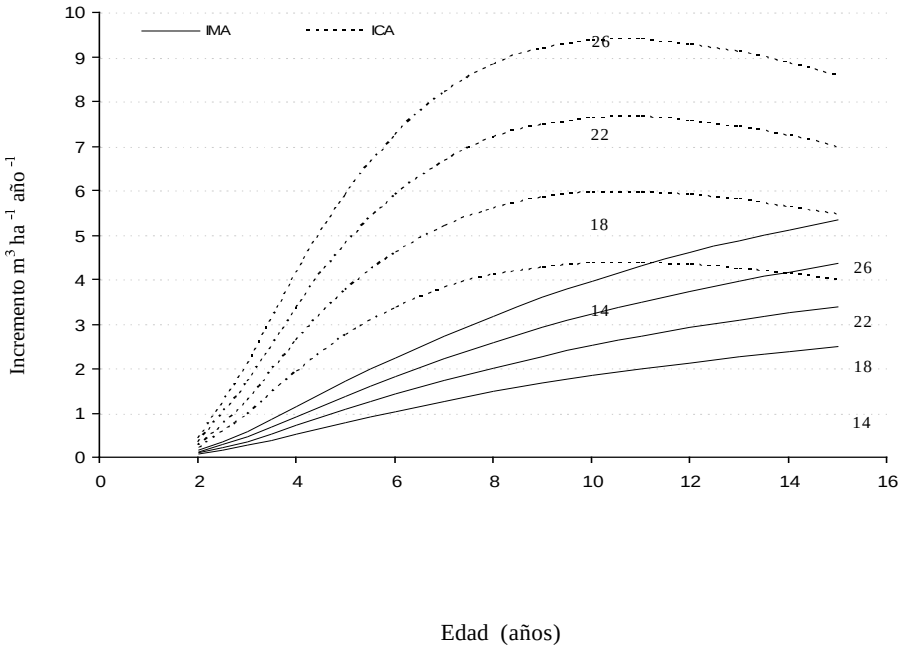

Figura 4. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio, a una edad base de 10 años.

Por tratarse de una plantación joven, las especies estudiadas aun se encuentran en una fase acelerada de crecimiento, tanto en área basal como en volumen, situación que se confirma al observar la curva del incremento medio anual que todavía no llega a su punto de culminación.

Para poder validar los estudios, a largo plazo, es conveniente dar seguimiento a los sitios de medición establecidos, por lo que los resultados presentados no deben extrapolarse más allá de los 13 años. Mediciones futuras permitirán establecer además patrones de mortalidad natural para el manejo adecuado de la densidad.

El SCRM que se presenta es además auxiliar para los datos de inventarios provenientes de las plantaciones, ya que permite no sólo calcular el volumen por hectárea de manera exacta, sino proyectarlo con una confiabilidad aceptable.

AGRADECIMIENTOS

Al C. José Luís López Pérez, propietario de las plantaciones de enriquecimiento de acahuales de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca, por permitir la realización de esta investigación, y por el apoyo económico brindado. Gracias.

Al M. en C. Celestino Flores por ser el medio a través del cual se establecimiento

cieron los contactos para el desarrollo de esta investigación y al ingeniero Juan Morales Hernández, por sus atenciones y por todo el apoyo en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

Adjers G., S. Hadengganan, J. Kuusipalo K. Nuryanto y L. Vesa. 1995. Enrichment planting of dipterocarps in logged-over secondary forest: effects of width, direction and maintenance method of planting line on selected *Shorea* species. *Forest Ecol. Manag*. 73:259-270.

Akindele, S. O. y V. M. LeMay. 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecol. Manag*. 226: 41-48.

Borders, B. E. 1989. Systems of equations in forest modelling. *Forest Science* 35: 548-556.

Bravo, M. A., H. M. P. de los Santos, M. G. Guillén, P. de la R. Hernández y J. R. L. Valdez. Sistema de crecimiento y rendimiento para plantaciones de caoba y cedro rojo en Tuxtepec, Oaxaca. En revisión en Fitotecnia Mexicana

Clutter, J. L. 1980. Development of taper function from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science* 26. p. 117-120.

Clutter, J. L., J.C. Forston, L. V. Piennar, G. H. Brister y R. L. Bailey. 1983. Timber Management: a quantitative approach. John Wiley and Sons. New York. 333 p.

Fang, Z. y R. L. Bailey. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *Forest Science* 45 (1): 85-100.

Ferreira, B. J. L., M. Marquesini y V. M Viana. 2004. Equacoes de volume para árvores de caxeta (T*abebuia cassinoides*) no Estado de Sao Paulo e sul do Estado do Janeiro. *Scientia Forestalis* 65: 162-175.

Forestry Suppliers Inc. 1992. Forestry, firefighting and tree planting. Catalogue No. 4. Jackson, MS. 508 p.

García M. E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen; 4ª. ed. México, D. F. 217 p.

García, O. 1995. Apuntes de mensura forestal. I. Estática. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 65 p.

García, C. X., Ramírez, M. H. Rodríguez, F. C., Jasso, M. J., Ortiz y S. C. A. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. *Ciencia Forestal* 23 (84): 9-8.

Gómez T. J., H. M. P. de los Santos y M. A. G. Fierros. 2006. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en María Lombardo, Oaxaca, México. En Revisión Fitotecnia Mexicana.

INEGI. 1995. San Pedro Pochutla, estado de Oaxaca. Cuaderno estadístico municipal. INEGI. Aguascalientes, Ags. 17 p.

Madrigal, H. S. y H. Ramírez, M. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índices de sitio en Michoacán. *Ciencia Forestal en México*. 20 (79): 35-57.

Miranda, F. y E. Hernández X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México 28: 29-179.

Montagnini, F., B. Eibl, L. Grance, D. Maiocco y D. Nozzi. 1997. Enrichment planting in overexploited subtropical forests of the paranaense region of Misiones, Argentina. *Forest Ecol. Manag*. 99: 237-246.

Piennar, L. V. y J. W. Rheney. 1988. Yield prediction for mechanically site-prepared flash pine plantations in the southeastern coastal plain. School of Forest Resources, University of Georgia, Athens. pp. 163-173.

Ramírez, A. H. 1981. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Ciencia Forestal en México* 16 (70): 87-108.

Rentería, A. J. B. 1995. Sistema de cubicación para *Pinus cooperi* Blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en Durango. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx. 66 p.

Reyes, V. J. R. H. M. De los Santos P. y M. A. G. Fierros. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en María Lombardo, Oaxaca. Enviado para su publicación Ciencia Forestal.

Ricker, M. y R. del Río. 2004. Projecting diameter growth in tropical trees: A new modeling approach. Forest Science. Vol. 50. No. 2. pp. 213-224.

Romahn de la V. C. F., H. Ramírez, M. y J. L. Treviño, G. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Cha'-pingo. México. 345 p.

Rose Jr. C. E. y T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions.*Forest Ecol. Manag*. 148: 51-61.

Schumacher, F. X. y F.S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber tree volume. *J. Agric. Res.* 47: 719-734.

Torres, J. J. M. y O. S. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa. México, D. F. 472 p.

Zepeda, B. E. M. y D. P. Rivero, B. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. *Ciencia Forestal* 51 (9): 3-36.

Manuscrito recibido el 25 de junio del 2007
Aceptado el 7 de diciembre del 2007

Este documento se debe citar como:
Galán Larrea, R., H. M. de los Santos Posadas y J. I. Valdez Hernández. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* l. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14(2):65-82.