

ÍNDICE DE SITIO Y PRODUCCIÓN MADERABLE EN PLANTACIONES FORESTALES DE *Gmelina arborea* EN TABASCO, MÉXICO

SITE INDEX AND TIMBER PRODUCTION IN FOREST PLANTATIONS OF *Gmelina arborea* IN TABASCO, MÉXICO

Pablo Martínez-Zurimendi^{1,2}, Marivel Domínguez-Domínguez^{*3}, Alfonso Juárez-García^{1,4}, Leydi M. López-López¹, Verónica de-la-Cruz-Arias¹ y Jorge Álvarez-Martínez^{1,4}

¹El Colegio de la Frontera Sur. Km. 15.5 carr. Villahermosa-Reforma. 86280, R. Guineo, 2ª secc, Villahermosa, Tabasco, México. ²Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Valladolid. Av. de Madrid 57. 34071, Palencia, España. ³Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Perif. Carlos A. Molina, Km 3.5 carr. Cárdenas-Huimanguillo, AP 24. 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México. ⁴Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, Prolongación Miguel Hidalgo 1519. 96950, Col. Centro, Jesús Carranza, Veracruz.

*Autora para correspondencia (mdguez@colpos.mx)

RESUMEN

El índice de sitio es una representación gráfica de la capacidad productiva de un área forestal, que describe la relación entre la altura dominante y la edad de un rodal (bosquete de características homogéneas), o árbol individual de una especie determinada. En este estudio se ajustaron los modelos de crecimiento de Von Bertalanffy, Chapman, Monomolecular, Logístico, Gompertz, Weibull, Hossfeld IV, Levakovic III, Korf y Sloboda para generar curvas anamórficas de índice de sitio para *Gmelina arborea* Roxb., con base en datos edad-altura dominante obtenidos de mediciones y remediciones en parcelas de muestreo de plantaciones forestales comerciales en el estado de Tabasco, México. Se utilizó el método de la curva guía; los parámetros de crecimiento de los modelos ajustados se obtuvieron con SAS, mediante regresión no lineal. De acuerdo con la bondad de ajuste, el análisis de residuales y su validación con la eficiencia, el error medio del modelo y la diferencia absoluta media, seis modelos resultaron satisfactorios. Se determinaron cinco curvas de índices de sitio con edad base de 10 años, las cuales se clasificaron en mala (14.5 m), regular (19.5 m), buena (24.5 m), muy buena (29.5 m) y excelente (34.5 m). Se ajustaron ecuaciones que cuantifican el índice de sitio en función del área basal y la edad de la plantación, útiles para definir la calidad de sitio hasta que la plantación alcance 5 años de edad o 19 m² ha⁻¹ de área basal. Se identificaron modelos de la evolución del diámetro medio cuadrático y el volumen de madera en las plantaciones en función de la edad, y el valor generado de índice de sitio. Estos modelos servirán para predecir la producción de madera (m³ ha⁻¹ año⁻¹) y el turno en el que se alcanzará un diámetro de corta determinado, en función del índice de sitio.

Palabras clave: Melina, curvas anamórficas, modelos de crecimiento, trópico húmedo.

SUMMARY

Site index is a graphical representation of the productivity of a forest area and describes the relationship between dominant height and age of a tree stand or individual of a particular species. In this study, the growth models of Von Bertalanffy, Chapman, Monomolecular, Logistic, Gompertz, Weibull, Hossfeld IV, Levakovic III, Korf and Sloboda were fitted to generate anamorphic curves of site index for *Gmelina arborea* Roxb., using age-dominant height data obtained from the measurements and re-measurements from sampling plots within commercial forest plantations in the state of Tabasco, México. The guide curve method was used; the growth parameters of the fitted models

were obtained by non-linear regression using SAS. In accordance with the goodness of fit, residual analysis, efficient validation, mean error and mean absolute difference of the model, six models were satisfactory. Five site index curves were determined, using 10 years as the base age, and were classified as poor (14.5 m), fair (19.5 m), good (24.5 m), very good (29.5 m) and excellent (34.5 m). Equations for quantifying the site index on the basis of the basal area and plantation age were fitted. The evolution of the quadratic mean diameter, the timber volume of the plantations in relation to age and the generated value for the site index were modelled; these were useful until the plantation reached an age of 5 years or 19 m² ha⁻¹ basal area. These equations will be beneficial in defining the quality of forest plantations, predicting timber production (m³ ha⁻¹ año⁻¹) and the turn wherein a determined cut diameter is attained.

Index words: Gmelina, anamorphic curves, growth models, humid tropics.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales y los bosques generan a la sociedad productos importantes maderables (*i. e.*, madera para aserrío, para tableros y para pulpa de papel) y no maderables (como miel, forraje y medicinas), así como muchos beneficios al ambiente (paisajísticos, conservación de suelos, captura de carbono y de agua atmosférica, entre otros). El estado de Tabasco tiene una superficie de 24,731 km², concentra 19.2 % de las plantaciones forestales comerciales con especies maderables de México, o sea 26,109 ha (CONAFOR-CP, 2011; CONAFOR, 2012), cuyas especies más representativas son cedro (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King) y macuilís (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC) entre las nativas, y melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.), hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.), acacia (*Acacia mangium* Willd.) y eucaliptos (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. urophylla* S. T. Blake y sus híbridos) entre las introducidas.

G. arborea es nativa del sureste asiático, capaz de crecer en una amplia variedad de climas y suelos (Hossain, 1999) y

se ha adaptado fácilmente al trópico húmedo y subhúmedo de México, especialmente en el sureste del país. Es necesario conocer el potencial productivo de las especies arbóreas y desarrollar programas eficientes de manejo, sobre todo en esta época de auge de las plantaciones forestales comerciales (García *et al.*, 1998; CONAFOR-CP, 2011), para lo cual se requiere clasificar la capacidad productiva de los terrenos forestales. La productividad es un concepto biológico integrador que se representa a través de un índice de sitio.

Se entiende por calidad de sitio a la capacidad productiva de un área, y comúnmente se refiere al volumen de madera producido por una masa forestal cuando llega a la edad del turno. Se puede cuantificar mediante el índice de sitio, que es una representación gráfica que describe la relación entre la altura dominante y la edad de un rodal o árbol individual (Prodan *et al.*, 1997). La altura dominante se define como la altura promedio de los 100 árboles con mayor diámetro por hectárea (Assmann, 1970), y se estima con el promedio de la altura de los 10 árboles de mayor diámetro de la parcela (Bengoa, 1999), ya que esta variable resulta independiente de la densidad y del manejo (Prodan *et al.*, 1997). Para determinar las funciones matemáticas que representen adecuadamente el crecimiento en altura de los árboles, se requiere evaluar diversos modelos como el de Chapman-Richards (Bertalanffy, 1957) y la función Weibull (1939).

Uno de los métodos más empleados para generar ecuaciones de índice de sitio de tipo anamórfico es el de la curva guía, que consiste en ajustar una curva promedio (curva guía) en todo el intervalo de observaciones altura-edad, y alrededor de dicha curva guía se construye una familia de curvas, las cuales representan distintos índices de sitio (Pérez-González *et al.*, 2012). Las familias de curvas anamórficas se construyen al despejar los parámetros de valor asintótico o de forma de los modelos, y su expresión se sustituye en la ecuación original. El valor asintótico se considera implícito y los parámetros de forma son comunes para todos los sitios (Clutter *et al.*, 1983; García *et al.*, 1998); al variar la edad y el índice de sitio deseado y mantener constante la edad base se genera la familia de curvas anamórficas. El número de curvas y la amplitud de intervalo entre éstas se determinan en función de la dispersión de los datos edad-altura dominante.

Gmelina arborea es una especie caducifolia de rápido crecimiento de la familia Verbenaceae, oportunista en bosques húmedos que se clasifica como pionera de vida larga. Se cultiva ampliamente en el sudeste de Colombia, en Costa Rica, Brasil, Venezuela, Trinidad, Belice, Cuba, México y otros países tropicales (Vásquez y Ugalde, 1995; Vallejos, 1996; Hossain, 1999). Crece en climas con periodos de sequía de 2 hasta 8 meses al año, con temperatura media anual de 21 a 28 °C, precipitación promedio anual de 762

a 5000 mm/año y altitud de 0 a 1300 m (Rojas-Rodríguez *et al.*, 2004; Muñoz *et al.*, 2010). Se desarrolla en suelos húmedos de al menos 50 cm de profundidad, con textura arcillosa, ligeramente arenosa y franca con buen drenaje, pH ligeramente ácido, neutro o alcalino, sin sales y fértil (Muñoz *et al.*, 2010).

Su madera se utiliza para aserrío, construcciones rurales y construcción en general, para generar tarimas, leña, muebles, artesanía, cajonería, pulpa para papel, contrachapados, embalajes, postes, tableros, carpintería y tableros aglomerados (Rojas-Rodríguez *et al.*, 2004). Los productores con mayor superficie de plantación utilizan semilla proveniente de huertos semilleros del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica (desde 2012, el CATIE produce semillas en huertos genéticamente probados), y los productores de menor superficie la obtienen de rodales semilleros (bosquetes en que se seleccionan los árboles parentales por su fenotipo, y se maneja una espesura adecuada para floración y producción de semilla) de melina de la misma institución.

Estudios de aptitud de suelos indican que en Tabasco existen 964,100 ha aptas para establecer plantaciones de *G. arborea* (SEDAFOP-COMESFOR, 2006), especie que se considera de rápido crecimiento y con buena calidad de la madera. Las plantaciones de melina en Tabasco se establecen predominantemente a marco real de 3 x 3 m. En esta situación el área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) se considera un buen predictor del índice de sitio y, si se comprueba que está correlacionado con la altura dominante, podrán utilizarse indistintamente en las primeras edades de la plantación.

El área basal se ha utilizado como factor predictor del índice de sitio en especies plantadas a marco definitivo, como *Populus x euroamericana* Dode (Guinier) (Bravo *et al.*, 1995) y en montes bajos de *Quercus pyrenaica* Willd., ambos en la cuenca del Duero, España (Bengoa, 1993a). El área basal (G) o el crecimiento en diámetro se consideran más sensibles a la variación de los cambios ambientales que el crecimiento en altura y, además, G es mejor predictor de la producción que la altura (Gutiérrez y Lopera, 2002; Crespo-Rodrigo y García-Quintana, 2013). Sin embargo, tiene algunas desventajas que han reducido su uso como índice de sitio (Bengoa, 1993b): es muy sensible a tratamientos silvícolas, sólo es posible su utilización en masas no aclaradas, y son necesarias mediciones periódicas en parcelas permanentes.

Los objetivos de este trabajo fueron: determinar la capacidad productiva de los terrenos donde se han establecido plantaciones forestales comerciales de *G. arborea* en Tabasco, a través del método de índice de sitio estimado con la altura dominante a una edad base, mediante la comparación

de modelos de crecimiento; explorar la utilidad del área basal para determinar el índice de sitio en edades jóvenes ($T < 5$ años) de la plantación; y estimar la producción de las plantaciones en función del índice de sitio y de modelos de crecimiento. La aplicación práctica del trabajo será determinar la edad en que los árboles alcanzarán el diámetro de corta y las producciones esperadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en el estado de Tabasco, ubicado en el sureste de México, en plantaciones forestales comerciales de *G. arborea*. Tabasco está situado entre las coordenadas 17° 19' 00" y 18° 39' 00" N y 90° 57' 00" y 94° 08' 00" O (INEGI, 2012). El grupo de suelos más abundante corresponde a gleysoles, vertisoles, fluvisoles y luvisoles (Palma-López *et al.*, 2007). El clima predominante es cálido húmedo y subhúmedo, con temperatura media anual de 27 °C, precipitación media de 2550 mm anuales que se presenta durante todo el año, con mayor abundancia en los meses de junio a octubre (INEGI, 2012).

Muestreo en las plantaciones

Se midieron 137 parcelas de 1000 m² de superficie, en

31 plantaciones ubicadas en los municipios de Cunduacán, Nacajuca, Jalapa, Centro, Huimanguillo, Emiliano Zapata, Tenosique y Balancán (Figura 1), de 1 a 10 años de edad (Cuadro 1), establecidas en suelos de tipo gleysol, vertisol y cambisol, de textura media a fina. El clima predominante es cálido húmedo con 10 a 11 meses de periodo lluvioso. En los árboles de cada parcela se midió el diámetro normal (cm) con forcípula (Haglof®, Mantax 80 cm, Suecia) y la altura total (m) con clinómetro (Brunton®, Clinomaster, Suecia); se recabó la edad de la plantación (años) y el sistema (Ugalde-Arias, 2003): 26 plantaciones estaban establecidas a marco real 3 x 3 m, y cinco con marcos diferentes (2 x 2, dos de 2 x 4, 4 x 4 y 4 x 5 m).

De esta base de datos, 93 parcelas rectangulares las midió un equipo de trabajo y se usaron para modelar la altura dominante en función de la edad; otras 40 parcelas circulares, medidas por otro equipo de trabajo, se emplearon para validar esos modelos. La semilla de las cuatro plantaciones de mayor superficie procedía de huertos semilleros clonales con una ganancia esperada en crecimiento de 30 % sobre las 27 plantaciones restantes cuyo material genético provenía de rodales semilleros. La altura dominante se calculó como la altura media de los 10 árboles más gruesos de cada parcela, que es un parámetro independiente de la historia silvícola del rodal (Assmann, 1970; Prodan *et al.*, 1997; Bengoa, 1999).

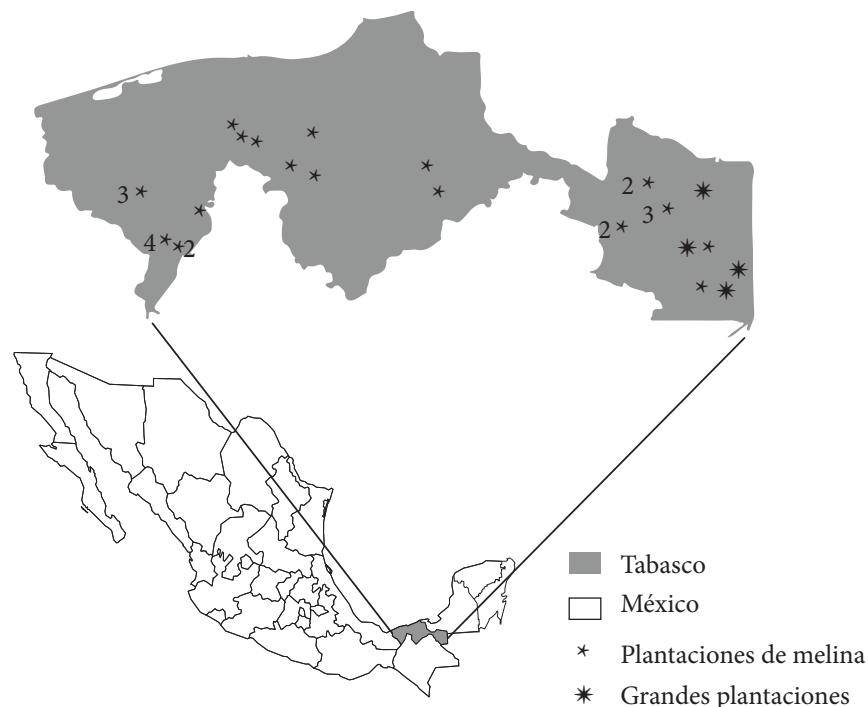


Figura 1. Distribución de las plantaciones de *Gmelina arborea* empleadas en el estudio en Tabasco, México. Los números junto a un asterisco representan la cantidad de plantaciones; las estrellas de ocho puntas muestran las cuatro plantaciones con material genético superior utilizadas en la segunda fase.

Cuadro 1. Características de las plantaciones de *Gmelina arborea* y de las parcelas empleadas en el estudio en Tabasco, México.

Municipio	Plantaciones	Parcelas	Proporción (%)	Edades y porcentaje de parcelas por edad (años) (%)
Huimanguillo	9	41	30.8	2 (8.3 %), 3 (14.3 %), 4 (8.3 %)
Nacajuca	2	4	3.0	2 (1.5 %), 3 (1.5 %)
Centro	2	5	3.8	2 (1.5 %), 4 (2.3 %)
Cunduacán	2	2	6.0	4 (1.5 %), 6 (1.5 %), 7 (1.5 %), 8 (1.5 %)
Jalapa	1	2	1.5	10 (1.5 %)
Emiliano Zapata	2	7	5.3	3 (2.3 %), 5 (3 %)
Tenosique	6	24	18.0	2 (9 %), 3 (9 %)
Balancán	11	42	31.6	1 (2.3 %), 2 (15 %), 3 (5.3 %), 4 (6 %), 5 (3 %)

Para los modelos de diámetro medio cuadrático (Dg), existencias en volumen de madera (V), y la evaluación del área basal (G) como estimador del IS se constituyó una nueva base de datos de 223 parcelas, de las cuales 93 fueron de la base inicial, y 130 fueron nuevas parcelas circulares de 1000 m² establecidas en cuatro grandes plantaciones del sureste del estado (Balancán y Tenosique), entre 1 y 3 años de edad y con espaciamiento de 3 x 3 m, facilitadas por el Ing. Felipe Vera Gaxiola. De estos datos, 80 % se utilizaron para la modelación y 20 % restante para la validación (seleccionados aleatoriamente).

Determinación de la capacidad productiva de los terrenos mediante el índice de sitio

Para la modelación de la altura dominante en función de la edad, se seleccionaron y evaluaron 10 modelos, propuestos con base en trabajos realizados con la especie en diferentes sitios, y por ser modelos generales y validados para predecir el crecimiento de árboles y masas forestales (Cuadro 2). La base de datos de 93 parcelas se procesó con la versión 9.1.3 de SAS (2003), y se obtuvieron los parámetros de crecimiento de los modelos y los ajustes de correlación. Se empleó el procedimiento NLIN (regresión no lineal) y el método GAUSS.

Para validar los modelos de índice de sitio se usaron las 44 parcelas medidas por el segundo equipo de trabajo, por lo que la bondad de ajuste de los modelos se midió de manera independiente. Estas parcelas se ubicaron en los Municipios de Balancán y Tenosique. Se estudiaron los errores a través de los parámetros MRES (error medio del modelo) y AMRES (diferencia absoluta media) (Pérez-González *et al.*, 2012). La eficiencia de los modelos (EF), considerada por muchos autores (Huang *et al.*, 2003) como un buen estimador para evaluar la confiabilidad de los modelos ajustados, se obtuvo mediante regresión no lineal. Se obtuvo el coeficiente de determinación ajustado (R²ajust) del análisis de regresión aplicado (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006). Con base en los valores de eficiencia del modelo,

error medio del modelo, diferencia absoluta media y coeficiente de determinación ajustado se definió el modelo con mejor ajuste.

$$MRES = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$
$$MRES (\%) = 100 \times \frac{MRES}{\bar{y}}$$

$$AMRES = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$
$$AMRES (\%) = 100 \times \frac{AMRES}{\bar{y}}$$

$$AMRES = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$
$$R^2 \text{ ajust aprox} = \frac{SSC - SSR}{SSC}$$

donde: y_i = valor observado o real; \hat{y}_i = valor estimado con el modelo; n = número de observaciones en la validación de los modelos; \bar{y} = valor promedio de los valores observados o reales; SSC = suma de cuadrados total; y SSR = suma de cuadrados medios de los residuos.

Utilidad del área basal (G) para determinar el índice de sitio

De la base de datos completa (223 parcelas), se seleccionaron las 209 parcelas de edad igual o inferior a 5 años y con espaciamiento 3 x 3 m. Se analizó la correlación y se realizó la regresión lineal entre G y altura dominante. Asimismo se analizó la relación de G con la supervivencia de las parcelas.

Modelación del Dg y V en función del índice de sitio y del tiempo

Se ajustaron modelos de evolución del Dg (cm) y de las existencias de madera (V, m³ ha⁻¹) en función del índice de sitio y la edad, como producto de una potencia del IS obtenido para la parcela a través de su edad y altura dominante y de una función de crecimiento (Cuadro 2).

$$Dg = IS^{b_0} \times f_1(T)$$
$$V = IS^{b_0} \times f_2(T)$$

Cuadro 2. Modelos utilizados para determinar el índice de sitio en plantaciones de *Gmelina arborea* en Tabasco, México.

Modelo	Ecuación
Von Bertalanffy	$H_{dom} = A_0 \times (1 - \text{EXP}(-A_1 \times T))^3$
Chapman	$H_{dom} = A_0 \times (1 - \text{EXP}(-A_1 \times T))^{A_2}$
Monomolecular	$H_{dom} = A_0 \times (1 - A_1 \times \text{EXP}(-A_2 \times T))$
Logístico	$H_{dom} = \frac{A_0}{1 + A_1 \times \text{EXP}(-A_2 \times T)}$
Gompertz	$H_{dom} = A_0 \times (\text{EXP}(-A_1 \times \text{EXP}(-A_2 \times T)))$
Weibull	$H_{dom} = A_0 \times (1 - \text{EXP}(-A_1 \times (T^{A_2})))$
Hossfeld IV	$H_{dom} = \frac{T^{A_2}}{A_1 + \frac{T^{A_2}}{A_0}}$
Levakovic III	$H_{dom} = A_0 \left(\frac{T^2}{A_1 + T^2} \right)^{A_3}$
Korf	$H_{dom} = A_0 \times (\text{EXP}(-A_1 \times T))^{A_2}$
Sloboda	$H_{dom} = A_0 \times (\text{EXP}(-A_1 \times \text{EXP}(-A_2 \times T^{A_3})))$

H_{dom} = altura dominante (m); T = edad de la plantación (años); EXP = función exponencial; A_0, A_1, A_2, A_3 = parámetros de los modelos. Ecuaciones tomadas de Zeide (1993), Vanclay (1995), Zamudio y Ayerde (1997), y García *et al.* (1998).

donde: T = edad de medición; B_0 = parámetros ajustados; IS = valor que toma la abscisa a los 10 años de edad, en la curva anamórfica que atraviesa los valores de altura dominante y edad de cada parcela; $IS = f(H_{dom}, T)$; $f_1(T)$ y $f_2(T)$ son funciones de crecimiento. Como ejemplo, para el modelo de Von Bertalanffy: $Dg = IS^{B_0} \times A_0 \times (1 - \text{EXP}(-A_1 \times T))^3$.

Para cada variable (Dg , V) se seleccionó el modelo que obtuvo mejores resultados, al valorar conjuntamente los estadísticos de la validación, eficiencia, diferencia media absoluta y error absoluto medio.

Edad en que se alcanza el diámetro de corta y producciones esperadas en cada condición de sitio

Con el modelo de Dg en función de IS y T , se calculó a qué edad el Dg alcanza 20 cm en cada condición de sitio. También se calcularon los Dg predichos en cada calidad de sitio, con los turnos comunes utilizados para la especie (6, 10 y 15 años). El modelo de volumen se utilizó para determinar el incremento medio anual en volumen (IMA) y el incremento corriente anual (ICA).

$$IMA = V(IS, T) / T$$

$$ICA = V(IS, T) - V(IS, T-1)$$

donde: IMA = incremento medio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$); ICA = incremento corriente anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$); $V(T)$ = volumen predicho para un IS y una edad determinada; T =

edad de la plantación (años).

Las producciones esperadas de las plantaciones se calcularon para los turnos comunes enumerados anteriormente y para cada condición de sitio.

RESULTADOS

Determinación de la capacidad productiva de los terrenos mediante el índice de sitio

Modelos de altura dominante. La mayoría de los modelos probados para determinar el índice de sitio en las plantaciones de *G. arborea* mostraron buen ajuste en cuanto al diagrama de dispersión de los datos edad-altura dominante; en el análisis estadístico los modelos de Hossfeld IV, Levakovic III, Sloboda, Chapman, Weibull, Gompertz, Logístico, y Von Bertalanffy resultaron convergentes y significativos (Cuadro 3).

Con base en los estadísticos de validación, eficiencia, error medio y diferencia absoluta media, los modelos presentaron diferencias numéricas a partir del tercer decimal, pero todos produjeron resultados similares. De acuerdo con estos resultados, los modelos Hossfeld IV, Weibull, Monomolecular, Levakovic III, Sloboda y Chapman, se pueden aplicar con la misma confiabilidad, y por ello aquí se proporcionan los parámetros y estadísticos de los 6 modelos (Cuadro 4). El modelo de Hossfeld IV estimó una altura

Cuadro 3. Análisis estadístico de la validación de los modelos para estimar índice de sitio en plantaciones de *Gmelina arborea* en Tabasco, México, determinados principalmente por la mayor eficiencia.

Modelo	Eficiencia (EF)	MRES (%)	AMRES (%)
Monomolecular	0.59	4.00	16.91
Sloboda	0.59	3.97	16.91
Weibull	0.59	4.13	16.83
Hossfeld IV	0.58	3.94	16.89
Chapman	0.58	4.05	16.84
Levakovic III	0.58	3.91	16.91
Gompertz	0.58	3.82	17.12
Logístico	0.56	3.07	17.82
Von Bertalanffy	0.52	3.71	18.59
Korf	0.25	5.69	25.67

MRES = error medio del modelo; AMRES = diferencia absoluta media.

dominante de 24.5 m a una edad base de 10 años, cuya ecuación quedó de la siguiente manera:

$$H_{dom} = \frac{T^{1.5978}}{0.2739 + \frac{T^{1.5978}}{29.486}}$$

donde: H_{dom} = altura dominante (m), y T = edad de la plantación (años).

Curvas de índice de sitio. Los índices de sitio determinados fueron cinco, que se clasificaron en bajo (14.5 m), regular (19.5 m), medio (24.5 m), alto (29.5 m) y excelente (34.5 m) (Figura 2).

La ecuación general para calcular el índice de sitio de una parcela a partir de los valores de su edad y su altura dominante fue:

$$IS = 24.49 \times H_{dom} \times (0.2739 + \frac{T^{1.5978}}{29.486})/T^{1.5978}$$

donde: IS = índice de sitio, H_{dom} = altura dominante (m), y T = edad de la plantación (años).

Utilidad del área basal para determinar el índice de sitio

Hubo una fuerte correlación ($R^2 = 0.90$) entre la altura dominante y el área basal en las edades juveniles de la plantación (menos de 5 años, Figura 3). El área basal puede utilizarse como un buen predictor del índice de sitio en las plantaciones establecidas a marco real 3 x 3 m y hasta el primer raleo (usualmente entre 3 y 5 años), ya que las medi-

ciones de altura requieren más tiempo de trabajo en campo. Una aproximación de la altura dominante puede calcularse mediante la ecuación:

$$H_{dom} = 3.3369 + 0.7696 \times G$$

donde: H_{dom} = altura dominante (m) y G = área basal ($m^2 ha^{-1}$).

La supervivencia promedio fue de 93 % y la mínima de 63 %. En áreas basales pequeñas (menores de $20 m^2 ha^{-1}$) la supervivencia es creciente con el área basal (a mayor supervivencia, mayor área basal). Cuando el área basal es mayor de $20 m^2 ha^{-1}$ la supervivencia presenta valores más bajos por efecto de la competencia porque se produce el autoaclareo.

Modelos de evolución del diámetro medio cuadrático (Dg) y del volumen de madera (V)

Para Dg los modelos que mejor se ajustaron a los datos fueron Chapman, Weibull y Hossfeld IV, para los cuales se proporcionan los parámetros y estadísticos de ajuste de estos tres modelos (Cuadro 4), con diferencias mínimas en los parámetros de validación EF, MRES % y AMRES % (Cuadro 5). El modelo de Chapman quedó ajustado como sigue:

$$Dg = (IS^{0.6768}) \times 3.3791 \times (1-EXP(-0.1855 \times T))^{1.0149}$$

donde: Dg = diámetro medio cuadrático (cm); IS = índice de sitio evaluado por la altura dominante (m) a la edad base 10 años; T = edad de la plantación (años).

El volumen de madera se ajustó adecuadamente con los

Cuadro 4. Resultados del análisis de regresión no lineal y parámetros estimados para los modelos de altura dominante (H_{dom}), diámetro medio cuadrático (Dg), y existencias en volumen de madera (V), en *Gmelina arborea*.

Variable	Modelo	G L modelo	G L error	Aprox. Pr > F		A_0	A_1	A_2	A_3	B_0
H_{dom}	Chapman	3	90	<.0001	Estimador	26.62	0.30	1.51		
					Error	2.25	0.09	0.37		
H_{dom}	Monomolecular	2	90	<.0001	Estimador	27.77	1.12	0.23		
					Error	2.47	0.09	0.05		
H_{dom}	Weibull	3	90	<.0001	Estimador	26.37	0.15	1.26		
					Error	2.31	0.03	0.18		
H_{dom}	Hossfeld IV	3	90	<.0001	Estimador	29.49	0.27	1.60		
					Error	3.55	0.07	0.28		
H_{dom}	Levakovic III	3	90	<.0001	Estimador	27.82	20.46	0.69		
					Error	2.21	12.28	0.19		
H_{dom}	Sloboda	4	89	<.0001	Estimador	29.17	13.89	1.83	0.38	
					Error	7.42	54.38	3.67	0.62	
Dg	Chapman	4	219	<.0001	Estimador	3.81	0.18	1.00		0.65
					Error	0.48	0.03	0.06		0.03
Dg	Weibull	4	219	<.0001	Estimador	3.82	0.18	1.00		0.65
					Error	0.51	0.01	0.05		0.03
Dg	Hossfeld IV	4	219	<.0001	Estimador	5.22	1.42	1.07		0.65
					Error	0.81	0.18	0.07		0.03
V	Chapman	4	219	<.0001	Estimador	0.93	0.38	3.89		1.80
					Error	0.29	0.03	0.28		0.10
V	Gompertz	4	219	<.0001	Estimador	0.75	6.67	0.51		1.85
					Error	0.23	0.31	0.02		0.10
V	Hossfeld IV	4	219	<.0001	Estimador	0.91	81.16	2.73		1.82
					Error	0.29	31.86	0.11		0.10

G. L. = grados de libertad; A_0, A_1, A_2, A_3, B_0 = coeficientes de los modelos antes definidos.

modelos de Hossfeld IV, Chapman y Gompertz (Cuadro 4), con diferencias mínimas en los parámetros de validación (Cuadro 5). El modelo de Hossfeld IV quedó ajustado como sigue:

$$V = (IS^{1.7167}) \times T^{2.7864} / (56.1319 + (T^{2.7864}) / 1.1799)$$

donde: V = existencias de volumen de madera de la plantación ($m^3 ha^{-1}$); IS = índice de sitio evaluado por la altura dominante (m) a la edad base 10 años; T = edad de la plantación (años)

Determinación de edades para el diámetro de corta y producciones esperadas

El máximo rendimiento medio anual de volumen de madera en las plantaciones de *G. arborea* en la región de

estudio se alcanza a los 6 años, edad en que el incremento medio anual (IMA) iguala al incremento corriente anual (ICA) (Figura 4). Este sería el turno óptimo para producción de celulosa porque los árboles a esa edad no tendrían dimensiones suficientes para madera de aserrío. Los turnos que deben aplicarse en cada plantación dependen del índice de sitio y del destino preferente de la madera; los turnos de 10 años permiten obtener una proporción importante de madera para aserrío en los terrenos con mayor calidad de sitio (Cuadro 6). La producción que se obtiene con el turno de 10 años es $10.5 m^3 ha^{-1} año^{-1}$ en sitios de calidad baja ($IS = 14.5$), que se incrementa con el índice de sitio hasta alcanzar $46.5 m^3 ha^{-1} año^{-1}$ en sitios de calidad excelente ($IS = 34.5$).

Los productores abandonan las plantaciones en lugares con índices de sitio bajos porque no resultan rentables, al cortarlas antes del turno y sustituir *G. arborea* por especies

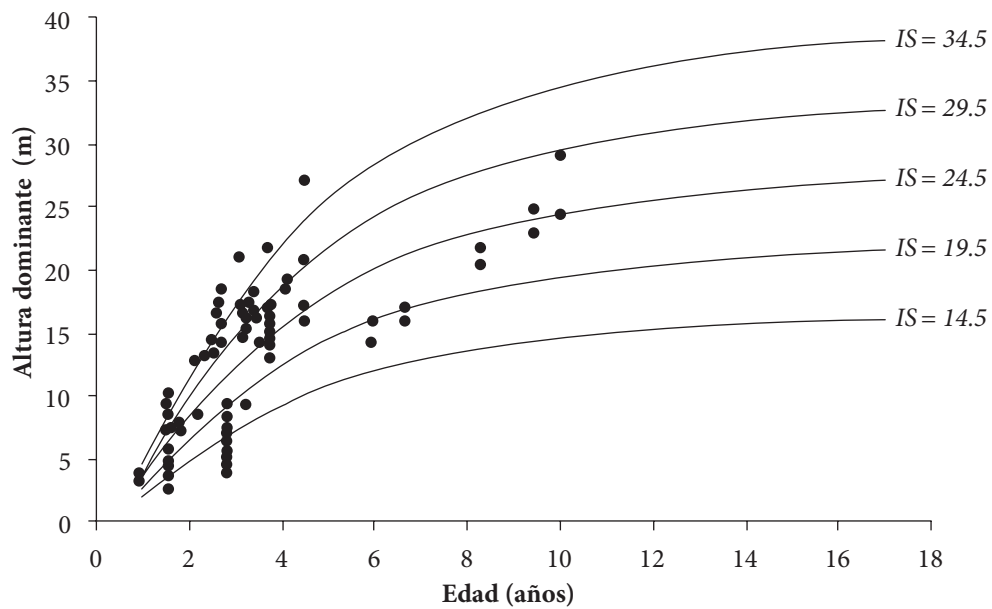


Figura 2. Curvas de índice de sitio (IS) y altura dominante de plantaciones de *Gmelina arborea* en Tabasco.

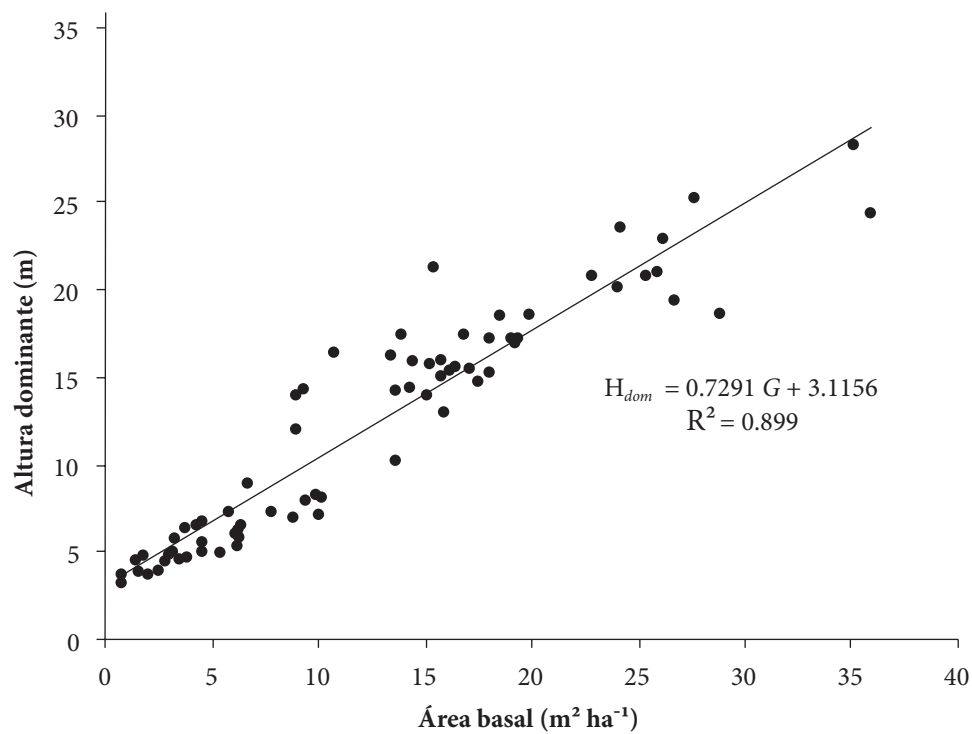


Figura 3. Relación entre área basal y altura dominante en plantaciones jóvenes de *Gmelina arborea*, en Tabasco, México.

Cuadro 5. Validación de los modelos de diámetro medio cuadrático (D_g) y volumen de madera (V) en las plantaciones de *Gmelina arborea* determinados principalmente por la mayor eficiencia.

Modelo	Eficiencia (EF)	MRES (%)	AMRES (%)
Modelos de diámetro medio cuadrático			
Logístico	0.85	-2.41	10.22
Weibull	0.84	-2.19	10.13
Chapman	0.84	-2.19	10.14
Monomolecular	0.84	-2.24	10.23
Hossfeld IV	0.84	-2.17	10.21
Modelos de volumen de madera			
Von Bertalanffy	0.89	7.34	20.09
Hossfeld IV	0.89	4.33	19.16
Gompertz	0.89	4.37	19.23
Chapman	0.89	4.09	19.33
Weibull	0.89	4.76	19.43

MRES = error medio del modelo; AMRES = diferencia absoluta media.

más adecuadas para esas zonas. Las áreas con *IS* de calidades medias son poco productivas y en ellas los productores aplican turnos de 15 o más años para obtener madera de aserrío, con producción media anual baja ($12.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En las áreas con *IS* de alta, muy alta y excelente calidad los productores aplican turnos de 10 años y obtienen proporciones altas de madera de aserrío y producciones entre 25.8 y $46.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los análisis estadísticos evaluados, los modelos de altura dominante presentan ajustes aceptables, generados por una amplia variabilidad en el índice de sitio de las plantaciones. Las calidades de sitio propuestas son similares a las tres clases que Vásquez y Ugalde (1995) definieron en Costa Rica a una edad base de 10 años: alta ≥ 26.71 m, media 19.7 a 26.7 m, y baja ≤ 19.69 m. También en Costa Rica Vallejos (1996) relacionó el índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares, y determinó cinco calidades a la misma edad base: marginal ≤ 12.10 m, bajo 12.11 a 20.92 m, medio 20.93 a 22.67 m, alto 22.68 a 27.79 m y excelente ≥ 27.80 m. En Guatemala, Cifuentes (2010) reportó cuatro clases de índice de sitio a la misma edad base: bajo 14 m, medio 18 m, alto 22 m, y excelente 26 m de altura.

La información dasométrica que se empleó para la construcción de las calidades de sitio fue muy diversa; en algunas parcelas de muestreo se reportaron alturas dominantes excelentes, y en otras bajas o regulares. Los crecimientos excelentes posiblemente se deban a las buenas condiciones de humedad, temperatura y suelos, similares a lo que men-

cionan Rojas-Rodríguez *et al.* (2004), y los mejores sitios para el establecimiento de *G. arborea* se ubican en las partes de los terrenos donde hay mayor disponibilidad de agua y nutrientes. La altura dominante a una determinada edad es buen predictor de la calidad productiva del sitio, cuando el material genético utilizado y el manejo aplicado en las plantaciones son similares.

En la calidad de la plantación intervienen otros factores, como el material genético, la preparación del terreno y el manejo de la plantación, además de la calidad del sitio. Si se utiliza germoplasma con mayor capacidad de crecimiento en altura el resultado será que la calificación del *IS* de las plantaciones será superior para un mismo clima y suelo. Algo similar ocurrirá si se mejora el manejo silvícola; por ejemplo, la mejor preparación del terreno, fertilización más adecuada y uso de inóculos micorrízicos, pueden incrementar la altura de los árboles y su producción. En la determinación del índice de sitio se encontraron cuatro plantaciones que por su potencial genético manifestaron mayores crecimientos, lo cual debe considerarse al interpretar estos valores.

El valor del área basal como predictor del índice de sitio se comprobó en los primeros 5 años de vida de las plantaciones, y hasta alcanzar áreas basales de $18.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Por su parte, la altura dominante tiene dos importantes limitaciones: en primer lugar es un indicador que agrupa los efectos de ambiente y genotipo; en segundo lugar es un índice cuantitativo pero no predictivo, pues las condiciones óptimas del suelo y clima para el establecimiento de la especie son indicadores de mayor *IS*, pero sólo la medición del crecimiento en una plantación instalada puede confirmarlo.

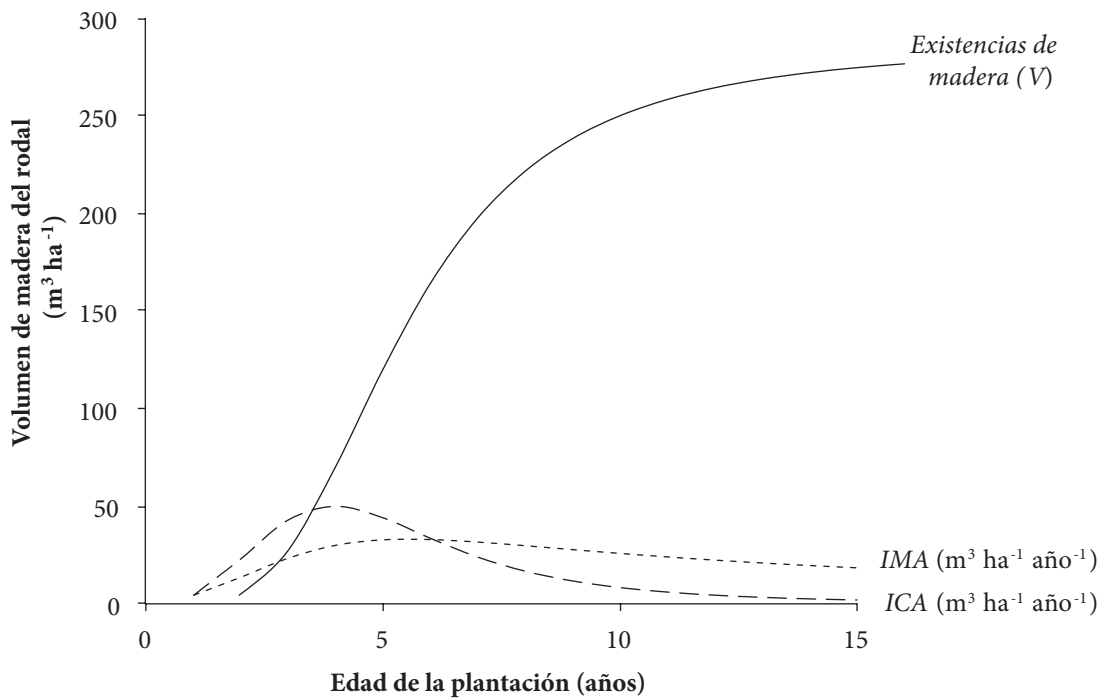


Figura 4. Existencias en volumen de madera (V), incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA), asociados a la edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* en sitios de calidad alta (IS = 24.5).

Cuadro 6. Parámetros de producción de madera estimados en plantaciones de *Gmelina arborea* en función del índice de sitio y la edad de corta.

	Calidades de índice de sitio				
	Baja 14.5 m	Media 19.5 m	Alta 24.5 m	Muy alta 29.5 m	Excelente 34.5 m
Edad (años) a $D_g = 20$ cm	19	9	7	5	4
D_g (cm) a los 6 años	13.8	16.8	19.7	22.3	24.8
D_g (cm) a los 10 años	17.4	21.2	24.8	28.1	31.2
D_g (cm) a los 15 años	19.3	23.6	27.6	31.3	34.8
IMA ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$) a los 6 años	13.4	22.2	32.9	45.3	59.2
IMA ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$) a los 10 años	10.5	17.4	25.8	35.5	46.5
IMA ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$) a los 15 años	7.5	12.5	18.4	25.4	33.2

D_g = diámetro medio cuadrático; IMA = incremento medio anual en volumen.

Al conocer el índice de sitio se puede saber a qué edad los árboles alcanzarán un diámetro determinado y que producciones se pueden esperar en función de la edad de corta. Estos parámetros son elementos fundamentales para establecer la rentabilidad financiera y estimar el retorno esperado. Los resultados aquí obtenidos sirven para definir las áreas de mejor calidad para establecer plantaciones forestales de *G. arborea*, así como predecir el crecimiento y rendimiento, y tomar decisiones de manejo como el turno óptimo aplicable.

CONCLUSIONES

La capacidad productiva de los terrenos para *Gmelina arborea* se determinó mediante cinco curvas anamórficas de índices de sitio a una edad base de 10 años, y se clasificó en cinco calidades, con una diferencia de 20 m entre la altura dominante del índice de sitio malo y el excelente. Los modelos de crecimiento de Chapman, Monomolecular, Weibull, Hossfeld IV, Levakovic III y Sloboda son útiles para predecir crecimiento en altura, diámetro y existencias en volumen de madera. El área basal a una edad

determinada (hasta 5 años) puede utilizarse también para estimar el índice de sitio en plantaciones establecidas a 3 x 3 m. Los modelos de crecimiento de Chapman, Weibull, Hossfeld IV y Gompertz son buenos predictores del diámetro medio cuadrático y de los volúmenes de madera, de una plantación a una edad determinada cuando se conoce su índice de sitio.

AGRADECIMIENTOS

A Felipe Vera Gaxiola y Adriana Pérez López que aportaron información de las plantaciones que se usaron para la validación. La Comisión Estatal Forestal del estado de Tabasco proporcionó datos de la red de parcelas. Fondos Mixtos de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONAcYT-Tabasco financió el proyecto "Diagnóstico del estado silvícola y desarrollo de plan de manejo en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Tabasco".

BIBLIOGRAFÍA

- Assmann E. (1970) The Principles of Forest Yield Study. Oxford Pergamon Press. New York, USA. 506 p.
- Bengoa J. L. (1993a) Crecimiento de las masas de rebollo de La Rioja: bases para su modelización. In: I Congreso Forestal Español. F. J. Silva-Pando y G. Vega (eds.). SECF V. II. Pontevedra, España. pp:467-472.
- Bengoa J. L. (1993b) Calidad de estación en rebollares de La Rioja: alternativas al índice de sitio. In: I Congreso Forestal Español. F. J. Silva-Pando y G. Vega (eds.). SECF V. II. Pontevedra, España. pp:473-477.
- Bengoa J. L. (1999) Estimación de la altura dominante de la masa a partir de la "altura dominante de parcela". Ventajas frente a la altura dominante de Assman. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, Fuera de Serie 1:311-321.
- Bertalanffy L. von (1957) Quantitative laws in metabolism and growth. *The Quarterly Review of Biology* 32:217-231.
- Bravo F., J. M. Grau y F. González-Antoñanzas (1995) Curvas de calidad y tablas de producción para *Populus x euramericana* en la cuenca del Duero. *Montes* 44:43-46.
- Cifuentes J. G. (2010) Evaluación y Monitoreo de Plantaciones Forestales en Guatemala. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala de la Asunción, Guatemala. 134 p.
- CONAFOR-CP, Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados (2011) Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México. 448 p.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2012) Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, a 15 Años de su Creación. A. Fierros G. M. CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México. 152 p.
- Clutter J. L., J. Forston, L. Pienaar, G. Brister and R. Bailey (1983) Timber Management: a Quantitative Approach. Wiley. Nueva York, EUA. 333 p.
- Crespo-Rodrigo A. e I. García-Quintana (2013) Manual de Tipificación, Inventario y Gestión de Rebollares. Junta de Castilla y León. Soria, España. 53 p.
- Domínguez-Domínguez M., F. Bravo-Oviedo y M. Del-Río-Gaztelurrutia (2006) Modelo de tamaño de copa en *Pinus sylvestris* L., en bosques del centro de España. *Interciencia* 31:168-175.
- García X., H. Ramírez, C. Rodríguez, J. Jasso y C. A. Ortiz (1998) Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. *Ciencia Forestal en México* 23:9-18.
- Gutiérrez V.H. y G.J. Lopera (2002) El árbol de área basal promedio como predictor del volumen de madera por usos del rodal. *Revista Facultad Nacional de Agricultura Medellín* 55:1683-1693.
- Hossain M. K. (1999) *Gmelina arborea*: A Popular Plantation Species in the Tropics. FACT sheet. Quick Guide Multipurpose Trees from Around the World. FACT 99 - 05. Forest, Farm and Community Tree Network. Arkansas, USA. 3 p.
- Huang S., Y. Yang and Y. Wang (2003) A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: Modelling Forest Systems. A. Amaro, D. Redd and P. Soares (eds.) CAB International, Oxfordshire, UK. pp:271-293.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012) Perspectiva Estadística Tabasco. 94 p. http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/estd_perspect/tab/pers-tab.pdf. (Enero 2014).
- Muñoz H. J., J. T. Sáenz, G. Orozco, J. D. Benavides y A. R. Prieto (2010) Evaluación de Plantaciones Forestales Comerciales en el Trópico Seco del Estado de Michoacán. Folleto Técnico Núm. 21. SAGARPA. INIFAP. CIRPAC. Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México. 54 p.
- Palma-López D. J., J. Cisneros, E. Moreno y J. A. Rincón (2007) Suelos de Tabasco: su Uso y Manejo Sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPOTAB-FUPOTAB. Villahermosa, Tab. México. 175 p.
- Pérez-González G., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi y J. D. Etchevers-Barra (2012) Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques* 18:7-24.
- Prodan M., R. Peters, F. Cox y P. Real (1997) Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ Sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica. 561 p.
- Rojas-Rodríguez F., D. Arias-Aguilar, R. Moya-Roque, A. Meza-Montoya, O. Murillo-Gamboa y M. Arguedas-Gamboa (2004) Manual para Productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 314 p.
- SAS (2003) SAS Institute Inc. User's Guide, version (9.1.3). Cary, North Carolina, USA. s/p.
- SEDAFOP-COMESFOR, Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesquero-Comisión Estatal Forestal (2006) Mapas de Aptitud de Suelos para Plantaciones de Melina en Tabasco. OEIDRUS-TAB, SEDAFOF. Villahermosa, Tabasco.
- Ugalde-Arias L. (2003) Guía para el Establecimiento y Medición de Parcelas para el Monitoreo y Evaluación del Crecimiento de Árboles en Investigación y en Programas de Reforestación con la Metodología del Sistema MIRA-SILV. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 14 p.
- Vallejos O. (1996) Productividad y Relaciones de Índice de Sitio con Variables Fisiográficas, Edafoclimáticas y Foliares para *Tectona grandis* L., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 147 p.
- Vanclay J. K. (1995) Growth models for tropical forest: a synthesis of models and methods. *Forest Science* 41:7-42.
- Vásquez W. y L. Ugalde (1995) Rendimiento y Calidad de Sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 33 p.
- Weibull W. (1939) A Statistical Theory of the Strength of Material. Ingeniörs Vetenskaps Akademiens Handligar. Stockholm. N° 153. 45 p.
- Zamudio F. J. y D. Ayerde (1997) Modelos de crecimiento. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales* 3:79-87.
- Zeide B. (1993) Analysis of growth equations. *Forest Science* 39:594-616.