

MODELO PARA DETERMINAR CALIDAD DE SITIO A EDADES TEMPRANAS DE CUATRO ESPECIES TROPICALES

A MODEL TO DETERMINE SITE QUALITY AT EARLY STAGES OF FOUR TROPICAL SPECIES

Jesús Gustavo Salazar García¹, Olga Santiago Trinidad², Vicente Sánchez Monsalvo²,
Carlos Monroy Rivera² y Edgar Couttolenc Brenis²

RESUMEN

Contar con un instrumento que permita evaluar la calidad de sitio de las plantaciones forestales a edades tempranas es de gran utilidad para tomar decisiones que permitan el buen manejo de las plantaciones forestales comerciales, lo que cobra importancia, en particular, ahora que se están plantando grandes superficies con taxa tropicales en los que se tiene poca experiencia acumulada. En la actualidad, solo es factible hacer una evaluación preliminar de las calidades de sitio a partir datos de desarrollo no cercanos al turno de las plantaciones, ya que, la mayoría de ellas son jóvenes, las más antiguas tienen 10 años. El presente trabajo tuvo como objetivo estimar la calidad de sitio en la etapa temprana de desarrollo, mediante un modelo exponencial que mejor represente la relación altura/edad, de *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* en el estado de Veracruz, con los datos obtenidos de la evaluación de 29 proyectos de plantaciones forestales comerciales del año 2000 al 2004. Se consideraron dos modelos: el exponencial y el de asociación exponencial. El que tuvo el mejor ajuste fue el primero; por lo tanto, este se utilizó para obtener la familia de ecuaciones a partir de las cuales se generó la familia de curvas anamórficas. Las cuatro ecuaciones desarrolladas permiten evaluar en forma aproximada la calidad de los sitios en las plantaciones forestales comerciales jóvenes de las especies seleccionadas.

Palabras claves: Calidad de sitio, *Cedrela odorata* L., *Gmelina arborea* Roxb., productividad de plantaciones, *Swietenia macrophylla* King, *Tectona grandis* L. f.

ABSTRACT

To count with a tool that allows the assessment of site quality of forest plantations at early stages is very useful for decision making in order to apply a good management for commercial forest plantations, which have become more important now a days when great areas are being planted with tropical taxa, about which there is little accumulated experience. At present it is only possible to make preliminary assessments of site qualities from development data not near the shift of plantations, since most of them are young and the eldest are 10 years old. The aim of the actual work was to estimate site quality at early stages, through an exponential model that best represents the height/age relation of *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* in Veracruz state, with the data obtained from the assessment of 29 projects of commercial forest plantations from the year 2000 to 2004. Two models were considered: exponential and of exponential association. The first one had the best fit; therefore, it was used to obtain the family of equations from which the family of anamorphic curves was generated. The four equations made it possible to have an approximate site quality evaluation of young commercial forest plantations of the selected species.

Key words: Site quality, *Cedrela odorata* L., *Gmelina arborea* Roxb., plantation productivity, *Swietenia macrophylla* King, *Tectona grandis* L. f.

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2010

Fecha de aceptación: 7 de marzo de 2012

¹ Campo Experimental Cotaxtla, CIRGOC, INIFAP. Correo-e: salazar.jesus@inifap.gob.mx

² Campo Experimental El Palmar, CIRGOC, INIFAP.

INTRODUCCIÓN

El establecimiento de plantaciones forestales comerciales en los trópicos requiere del uso de herramientas que ayuden a la determinación del potencial productivo de los terrenos en donde se desarrollan las diferentes especies. Conocer la calidad de sitio a edades tempranas permite al técnico o al plantador evaluar si la especie de interés será exitosa en predios de productividad variable. En función de la calidad del sitio se podrán tomar acciones respecto a la continuación del cultivo o su remplazo, así como de la programación de las prácticas silvícolas.

En México cobra importancia este conocimiento, en particular, ahora que se están plantando grandes superficies con taxa tropicales en los que se tiene poca experiencia acumulada. Así que reconocer lo más pronto posible las condiciones ambientales en las que crecen las plantaciones forestales comerciales ubicadas en este ecosistema, favorece la buena planeación de los tratamientos e inversiones que se deben hacer en distintos ámbitos.

Actualmente, solo es factible hacer una evaluación preliminar de las calidades de sitio, con base en datos de desarrollo no cercanos al turno de las plantaciones, ya que, la mayoría de ellas son jóvenes, las más antiguas tienen 10 años.

El manejo de las áreas forestales requiere de que se conozca la calidad de los terrenos donde se instalan las plantaciones comerciales, misma que está muy relacionada con las características ambientales, de las que dependen los rendimientos de los árboles y sus productos. A partir de mejores condiciones climáticas y edáficas tendrán tasas de crecimiento superiores (Carmean, 1975; Woodard, 1997). El contar con un instrumento para valorar *ex ante* la calidad de sitio hace posible maximizar los beneficios y facilita la toma de decisiones (Woodard, 1997). Los estudios sobre el particular identifican de los mejores lugares para el desarrollo de los árboles, de acuerdo al potencial esperado de cada especie (Andenmatten y Letourneau, 1997; Herrera y Alvarado, 1998; Splechtna, 2001).

El sitio es el equivalente al hábitat y se considera como la suma de los factores que soportan e influyen en la vegetación (Heiberg y White, 1956). Por lo tanto, el índice de sitio es un indicador de la capacidad productiva inherente al lugar donde se establecen los bosques o las plantaciones forestales (Mendoza, 1993; Woodard, 1997).

La calidad de sitio se evalúa de forma directa e indirecta (Clutter *et al.*, 1983). Los métodos directos utilizan los datos históricos de productividad en parcelas permanentes, o los datos de volumen o alturas de parcelas temporales (MacFarlane *et al.*, 2000). Los indirectos emplean las relaciones entre

INTRODUCTION

The establishment of commercial forest plantations in the tropics demands the use of tools that help to determine the productive potential of the lands where different species grow. To know site quality at early stages lets the technician or planter to assess if the focal species will be successful in lands of varying productivity. In terms of site quality, actions that involve the continuation of the crop or its substitution or forestry practices can be undertaken.

Nowadays this knowledge is particularly important in Mexico as great areas are being planted with tropical taxa, about which there is small accumulated experience. Thus, the sooner the environmental conditions where commercial forest plantations located in this ecosystem are acknowledged, a better planning can be made of the treatments and investments that must be done in different scopes.

At present it is only feasible to have a preliminary assessment of site qualities based upon development data no near to the shift of plantations, since most of them are young, being the eldest, 10 years old.

The management of forest areas demands that the quality of lands where commercial plantations are installed, which is closely related to the environmental characteristics, from which trees and their product yields depend. From the best climatic and edaphic conditions there will be high growth rates (Carmean, 1975; Woodard, 1997). To count with an instrument to make and *ex ante* assessment of site quality makes it possible to maximize the benefits and favours decision taking (Woodard, 1997). Studies in this regard identify the best places for the development of trees, according to the expected potential of each species (Andenmatten and Letourneau, 1997; Herrera and Alvarado, 1998; Splechtna, 2001).

Site is equivalent to habitat and it is considered as the sum of factors that support and influence vegetation (Heiberg and White, 1956). Therefore, site index is an indicator of the productive ability inherent to the place where forests or forest plantations are established (Mendoza, 1993; Woodard, 1997).

Site quality is assessed directly or indirectly (Clutter *et al.*, 1983). Direct methods use historic productivity data in permanent lots, or of the data of volume or heights of temporary lots (MacFarlane *et al.*, 2000). Indirect methods use the relations among the canopy species; the characteristics of understory vegetation, topographic, climatic and edaphic factor and the chemical composition of foliage (Chen *et al.*, 1998; Wang, 1998). They also include the height of the stand (Clutter *et al.*, 1983; Fontes *et al.*, 2003), in which it is assumed that height growth of the species has a positive relation with the inherent production of wood volume of the site.

las especies del dosel; las características de la vegetación del sotobosque; los factores topográficos, climáticos y edáficos, y la composición química del follaje (Chen *et al.*, 1998; Wang, 1998). También incluyen la altura del rodal (Clutter *et al.*, 1983; Fontes *et al.*, 2003), en el cual se asume que el crecimiento en altura de la especie tiene una relación positiva con la producción inherente al volumen de madera del sitio.

Además, si se considera que una de las principales estrategias de supervivencia de un árbol es dominar el sitio lo más rápido posible, como sucede con las especies no tolerantes del presente estudio (*Cedrela odorata* L., *Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* Roxb. y *Swietenia macrophylla* King), estas taxa se desarrollan primero en altura, con un incremento exponencial en sus etapas iniciales de crecimiento. Dicho comportamiento corresponde con las curvas de crecimiento de los árboles tropicales en el mundo (Del Amo y Nieto, 1983; Onyekwelu y Fuwape, 1998; Bermejo *et al.*, 2004; Upadhyay *et al.*, 2005). Entonces, solo después de una estatura determinada, el efecto del crecimiento es resultado de la calidad de sitio.

Los individuos que se utilizan para determinar estos índices, por lo general, son los dominantes y codominantes (Huang y Titus, 1993; MacFarlene *et al.*, 2000; Otarola *et al.*, 2001), debido a que son los que han aprovechado todos los recursos del sitio. Esto puede ser considerado como el reflejo del crecimiento de la especie en un sitio. Es importante mencionar que se tienen experiencias, aunque no en taxa tropicales, cuyas evaluaciones del índice de sitio en plantaciones de corta edad se relacionan con los elaborados posteriormente para la misma especie (Ferree *et al.*, 1958). Los índices de calidad de sitio para plantaciones en edades tempranas dan pauta para la toma de decisiones de los productores forestales, al permitirles conocer, de forma aproximada, las propiedades del predio que fue plantado con *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis* o con *Gmelina arborea*.

Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue estimar la calidad de sitio en la etapa temprana de desarrollo de las cuatro especies más importantes en las plantaciones forestales comerciales de Veracruz (*Cedrela odorata*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea* y *Swietenia macrophylla*) mediante un modelo exponencial que represente mejor la relación altura/edad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de altura y edad se tomaron de una muestra para evaluar las plantaciones forestales comerciales tropicales apoyadas por el Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el estado de Veracruz. El estudio consistió en un muestreo al azar con sitios de 100 m² ha⁻¹ plantada, lo que da una intensidad de muestreo

Besides, if it is considered that one of the main strategies of survival of a tree is to dominate the place as these non-tolerant species do (*Cedrela odorata* L., *Tectona grandis* L. f., *Gmelina arborea* Roxb. y *Swietenia macrophylla* King) they tend to develop height first, with an exponential increment in the initial stages of growth. Such behavior is proper of growth curves of tropical trees around the world (Del Amo and Nieto, 1983; Onyekwelu and Fuwape, 1998; Bermejo *et al.*, 2004; Upadhyay *et al.*, 2005). Then, only after some height is attained, growth effect is the result of site quality.

Individuals used to determine these indexes, in general, are dominant and co-dominant (Huang and Titus, 1993; MacFarlene *et al.*, 2000; Otarola *et al.*, 2001), as they have made the most of all the site resources. This can be understood as a reflection of the growth of a species in a particular place. It is important to mention that there are some experiences, even though they are not with tropical species, whose evaluations of site index in young plantations are related to site indexes formulated afterwards for the same species (Ferree *et al.*, 1958). Site quality indexes for plantations in early stages sets out the guidelines for decision taking by forest producers, by letting them know, in an approximate way, the properties of land that was planted with *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis* or *Gmelina arborea*.

According to all the former arguments, the aim of the present paper was to estimate site quality at early stages of the four most important species used in commercial forest plantations of Veracruz state (*Cedrela odorata*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea* and *Swietenia macrophylla*) through an exponential model that better represents the height/age relation.

MATERIALS AND METHODS

Height and age data were taken from a sample to assess tropical commercial forest plantations supported by the Commercial Forest Plantation Development Program (PRODEPLAN) of the National Forest Commission (CONAFOR) in Veracruz state. The study consisted in a random sampling with 100 m² ha⁻¹ planted sites, which means that sampling intensity is 1%. Within the universe of 29 projects of commercial plantations sponsored until 2004, 1, 012 sites were visited: 565 of *Cedrela odorata*, 201 of *Tectona grandis*, 151 of *Gmelina arborea* and 95 of *Swietenia macrophylla*.

Model of site quality buildup

The pairs of data (height-age) of each species were put into a graphic in order to represent all the possible site qualities in all the observed ages, a condition that must be accomplished to fit the equations that are not biased to site index (Clutter *et al.*, 1983).

de 1%. Dentro de un universo de 29 proyectos de plantaciones comerciales financiados hasta 2004, se visitaron 1,012 sitios: 565 fueron de *Cedrela odorata*, 201 de *Tectona grandis*, 151 de *Gmelina arborea* y 95 de *Swietenia macrophylla*.

Construcción del modelo de calidad de sitio

Los pares de datos (altura-edad) de cada especie se graficaron, para determinar si representan a todas las posibles calidades de sitio en todas las edades observadas, condición que debe cumplirse para ajustar ecuaciones que no estén sesgadas al índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

Se tomaron únicamente los árboles más grandes de cada edad. Estos individuos ocuparon una posición privilegiada en su hábitat y aprovecharon las prácticas de plantación empleadas, los cuidados del cultivo y la potencialidad de las procedencias (Carmean, 1975; Clutter *et al.*, 1983).

En el caso de *Cedrela odorata* se seleccionó la información de 393 sitios, y se obtuvo el promedio de altura de los tres árboles más grandes, con los que se trabajaron alturas dominantes promedio asociadas con una edad de 12 a 36 meses; con esos datos se ajustó la curva guía, ya que después de 12 meses se alcanzan alturas de 1.30 m, y los individuos quedan libres de factores como la calidad de planta, métodos de plantación, competencia con otras especies y depredación (Ferree *et al.*, 1958).

En *Tectona grandis* los crecimientos mayores a 1.3 m se observaron desde los 5 meses; por ello se tomaron en cuenta los pares de datos para las variables de interés a partir de 5 meses y hasta los 45 meses, pero algunas edades como 10, 18, y 28 meses no se incluyeron, porque carecen de un intervalo completo de datos. También *Gmelina arborea* presenta alturas mayores a 1.3 m en pocos meses, aunque solamente se consideró el periodo de 11 a 52 meses de plantación. En el caso de *Swietenia macrophylla* se incorporaron nueve pares de datos correspondientes desde 11 hasta 53 meses de edad.

Modelo

Dado que en las primeras etapas de desarrollo de las especies forestales tropicales presentan un crecimiento exponencial vertical (Husch *et al.*, 1972; Del Amo y Nieto, 1983); se probaron dos modelos para ajustar una ecuación guía: forma exponencial (1) y de asociación exponencial (2):

$$Altura = a \times EXP (b \times EDAD) \quad (1)$$

$$Altura = a \times (b - EXP (- c \times EDAD)) \quad (2)$$

Only the tallest trees of every age were taken. These individuals had a privileged position in their habitat and made the most of the plantation practices, culture care and provenance potential (Carmean, 1975; Clutter *et al.*, 1983).

In the case of *Cedrela odorata*, the information from 393 sites was selected and the average of the three tallest trees was obtained, with which the dominating average heights linked to an age of 12 to 36 months were handled; with these data the guide curve was fit, as after 12 months height of 1.30 are achieved, and individuals become free from factors such as plant quality, plantation methods, competence with other species and predation (Ferree *et al.*, 1958).

In *Tectona grandis* growths over 1.3 m were observed since they were 5 months old; thus, pairs of data from that age until 45 months old were taken for the focus variables, but some ages (10, 18 and 28 months were not included as they lack a complete data interval. *Gmelina arborea* also showed heights over 1.3 m in a few months, but only from 11 to 52 months were taken into account. In the case of *Swietenia macrophylla*, nine pairs of data from 11 to 53 months old were included.

Model

Since the first stages of development of tropical tree species have a vertical exponential growth (Husch *et al.*, 1972; Del Amo and Nieto, 1983), two models were tested to fit a guide equation: of exponential form (1) and of exponential association (2).

$$Height = a \times EXP (b \times AGE) \quad (1)$$

$$Height = a \times (b - EXP (- c \times AGE)) \quad (2)$$

Where:

Height = Total height in meters of the tallest trees

Age = Plantation age in months

EXP = Natural logarithmic base

a, *b* and *c* = Estimated coefficients by non-linear regression

Once the model was defined which had the best data fit, a general family of equations was formulated in which the origin was modified and thus the lines of the family of anamorphic curves was obtained (Clutter *et al.*, 1983; Montero and Kanninen, 2003).

The general model of Site Quality Estimation at Early Stages was the following:

$$ECSET = AD \times EXP (b \times (ER \times EP)) \quad (3)$$

Donde:

Altura = Altura total en metros de los árboles más grandes
Edad = Edad de plantación en meses
EXP = Base de los logaritmos naturales
a, *b* y *c* = Coeficientes estimados por medio de la regresión no lineal.

Una vez definido el modelo que se ajustó mejor a los datos, se procedió generar la familia de ecuaciones, en las que se varió el origen y así se obtuvieron las líneas de la familia de curvas anamórficas (Clutter *et al.*, 1983; Montero y Kanninen, 2003).

El modelo general de la Estimación de Calidad de Sitio a Edades Tempranas fue el siguiente:

$$ECSET = AD \times EXP (b \times (ER \times EP)) \quad (3)$$

Donde:

ECSET = Estimación de calidad de sitio a edades tempranas
AD = Altura promedio total de los árboles dominantes y codominantes del sitio que se va a evaluar
EP = Edad de plantación en meses
ER = Edad de referencia que varía entre especies de 36 hasta 54 meses
EXP = Base de los logaritmos naturales.

Inicialmente, el ajuste de las curvas de crecimiento con los crecimientos máximos por especie se hizo con el procedimiento "PROC MODEL" del Programa estadístico SAS Versión 8 (SAS, 2000), y como criterio para la selección del mejor modelo se emplearon, en primera instancia el valor de Pseudo r^2 , así como el cuadrado medio de los residuales.

Sin embargo, al efectuar el análisis, se presentaron problemas de colinealidad del modelo de asociación exponencial con valores altos en el número condicionante del diagnóstico de colinealidad del procedimiento empleado. Por lo tanto, se procedió a probar si las variables independientes (parámetros y edad) tienen relación significativa con la variable dependiente (altura), por medio de la prueba de Tasa de Verosimilitud (*Likelihood ratio*) indicada para las muestras pequeñas, como es el caso de los datos analizados (SAS, 2000). Si las variables son significativas, entonces se concluye que los parámetros asociados con estas no son cero, así que dichas variables deben incluirse en el modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que en *Cedrela odorata* y *Tectona grandis* se tuvieron los mejores indicadores para el Cuadrado Medio de Residuales y la r^2 ajustada para el modelo exponencial;

Where:

ECSET = Estimation of site quality at early stages
AD = Total height average of dominant and co-dominant trees of the site to be assessed
P = Plantation age in months
ER = Reference age that varies between species from 36 to 54 months
EXP = Natural logarithmic base

Initially, the fit of growth curves with the maximum growths per species was made by the "PROC MODEL" of SAS V. 8 (SAS, 2000), and the best model was selected by Pseudo r^2 and the mean square of residuals, too.

However, when analysis was made, collinearity problems arose with the exponential association with high values in the conditioning number of collinearity diagnosis of the procedure that was used. Therefore, what followed was to prove if the independent variables (parameters and age) have a significant relation with the dependent variable (height), by means of the Likelihood ratio test advised for small samples, as it happened with the analyzed data (SAS, 2000). If the variables are significant, then it is concluded that the associated parameters with them are not zero, so that those variables must be included in the model.

RESULTS AND DISCUSSION

Results show that *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* had the best indicators for the Mean Square of Residuals and the fitted r^2 for the exponential model; while for *Gmelina arborea* and *Swietenia macrophylla* they were in the exponential association model (Table 1). However, when it was tested if the independent variables have a significant relation with the dependent variable in the exponential association, in all the cases considered, the second parameter has not a significant value, and thus, it should not be included in the model, in such a way that the exponential model results. Therefore, this model will be used for the estimation of site quality at early stages. The exponential functions fitted for each species vary in regard to the age of the plantation (Table 2).

After using the guide curve of site index (Clutter *et al.*, 1983) the equations to estimate site quality at early stages were obtained. To have clearer results were six months multiples were fit to get complete years or complete years with six months, and thus, to make it easier to estimate site quality to make comparisons with other plantations (Table 3).

With the exponential equations graphics were prepared for the estimation of site quality, in which are represented the expected growths in height for different site qualities at a reference age. Growth lines were found so that they would be in the cloud of data of the accomplished sampling.

mientras que, para *Gmelina arborea* y *Swietenia macrophylla* fueron en el modelo de asociación exponencial (Cuadro 1). Sin embargo, al probar si las variables independientes tienen una relación significativa con la variable dependiente, en el modelo de asociación exponencial, para todos los casos, el segundo parámetro no tiene valor significativo, por tanto, no debería ser incluido en el modelo, de tal manera que resulta el modelo exponencial. Por consiguiente, este se usará para la estimación de calidad de sitio a edades tempranas. Las funciones exponenciales ajustadas para cada especie varían con respecto a la edad de plantación a la variación (Cuadro 2).

In Figure 1 can be observed the curves that indicate growth potential of *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* and *Swietenia macrophylla* in different places of Veracruz state. If the lines were graded from the highest to the lowest, there would be a subjective classification system. The first quality sites would be those in which the average height of the dominant trees are between the first and the second lines; those of second quality would be between the second and third lines; those of the third quality, between the third and the fourth lines; those of the fourth quality would be between the fourth and the fifth lines and, finally, those under the fifth line.

Cuadro 1. Comparación de los cuadrados medios de residuales, coeficientes de determinación ajustados y de la prueba de razón de verosimilitud de los modelos probados por especie.

Table 1. Comparison of mean square of residuals, fitted coefficients of determination and the likelihood ratio for the tested models by species.

Especie	Modelo	Cuadrados medios de residuales	r ² ajustada	Prueba de razón de Verosimilitud
<i>Cedrela odorata</i> L.	Exponencial	0.97590	0.8691	a**, b*Edad**
	A s o c i a c i ó n exponencial	1.05545	0.8585	a**, b ^{NS} , c*Edad**
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Exponencial	0.50102	0.9186	a**, b*Edad**
	A s o c i a c i ó n exponencial	0.52226	0.9151	a**, b ^{NS} , c*Edad**
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Exponencial	5.45642	0.8762	a**, b*Edad**
	A s o c i a c i ó n exponencial	4.59356	0.8958	a**, b ^{NS} , c*Edad**
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Exponencial	0.19154	0.9264	a**, b*Edad**
	A s o c i a c i ó n exponencial	0.17327	0.9334	a**, b ^{NS} , c*Edad**

** = significativa al 0.001, NS = No significativa

** = significant at 0.001, NS = Non significant

Cuadro 2. Modelo exponencial ajustado por especies y su edad base utilizada.

Table 2. Exponential model fit for species and the age that was used as a basis.

Especies	Modelo exponencial	Edad base meses
<i>Cedrela odorata</i> L.	Altura = 0.890201 x EXP(0.067058 x edad)	36 (3 años)
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Altura = 1.584214 x EXP(0.038716 x edad)	45 (3.75 años)
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Altura = 2.996434 x EXP(0.039301 x edad)	52 (4.33 años)
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Altura = 0.706203 x EXP(0.038004 x edad)	53 (4.417 años)

Después de utilizar el método de la curva guía del índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983) se obtuvieron las ecuaciones que sirven para realizar la estimación de la calidad de sitio a edades tempranas. Con el fin de tener más claridad en los resultados, se ajustaron múltiplos de seis meses para obtener años completos ó años completos con seis meses, y hacer más fácil la estimación de la calidad del sitio para realizar comparaciones con otras plantaciones (Cuadro 3).

If a potential site quality of a young plantation must be known, it is necessary to measure the average height of the tallest trees of the plantation; Wadsworth (2000) mentions that 100 dominant and codominant trees in an hectare, in addition to which it is necessary to know the age of the plantation. For example, if there is one of *Cedrela odorata* 2.5 m average of the highest trees, and a 24 months old, with the equation of this species in Table 3 it is estimated that after 3 years. These

Cuadro 3. Ecuación para el cálculo de la estimación de calidad de sitio a edades tempranas.
Table 3. Equation for the estimation of site quality at early stages.

Especie	ECSET
<i>Cedrela odorata</i> L.	$ECSET = AD \times EXP(0.067058 \times (36 - Edad))$
<i>Tectona grandis</i> L. f.	$ECSET = AD \times EXP(0.038716 \times (42 - Edad))$
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	$ECSET = AD \times EXP(0.039301 \times (48 - Edad))$
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$ECSET = AD \times EXP(0.038004 \times (48 - Edad))$

Con las ecuaciones exponenciales se prepararon las gráficas para la estimación de la calidad del sitio, en las cuales se representan los crecimientos en altura esperados para diferentes calidades de sitio a una edad de referencia. Se ubicaron las líneas de crecimiento para que estuvieran dentro de la nube de datos del muestreo realizado.

En la Figura 1 se observan las curvas que indican el potencial de crecimiento de *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Swietenia macrophylla* en diferentes sitios del estado de Veracruz. Si se calificaran las líneas de la más alta a la más baja, se tendría un sistema subjetivo de clasificación. Los sitios de primera calidad correspondieron aquellos en los que la altura promedio de los árboles dominantes se colocan entre la primera y la segunda líneas; los de segunda calidad serán los que están entre la segunda y la tercera líneas; los de tercera, entre la tercera y la cuarta líneas; los de cuarta estarán entre la cuarta y la quinta líneas y, por último, los que se ordenen por debajo de la quinta línea.

values indicate that the site would be classified between 4 and 6 m, with sites of the third class.

In Quintana Roo it has been documented that in the best condition of growth of the tall trees of *Cedrela odorata*, they get as tall as 5 m after three years old, which coincides with the third condition that is from 4.5 to 6.31 m for the plantations of Veracruz (García-Cuevas et al., 2007). The growth curves determined in commercial forest plantations of Oaxaca resulted similar with an average growth to the three years of 3 m, which would belong to the fourth category obtained in Veracruz. The former shows that in this state there can be better conditions for the growth of *Cedrela odorata* than in other states of the country.

Gmelina arborea showed the highest growth rate among the four species that were assessed. If classified according the lines previously defined (Figure 1), in the sites of first class it would be expected that the dominant trees would reach from 15.1 to 20 m or more after four years: the sites of second class could

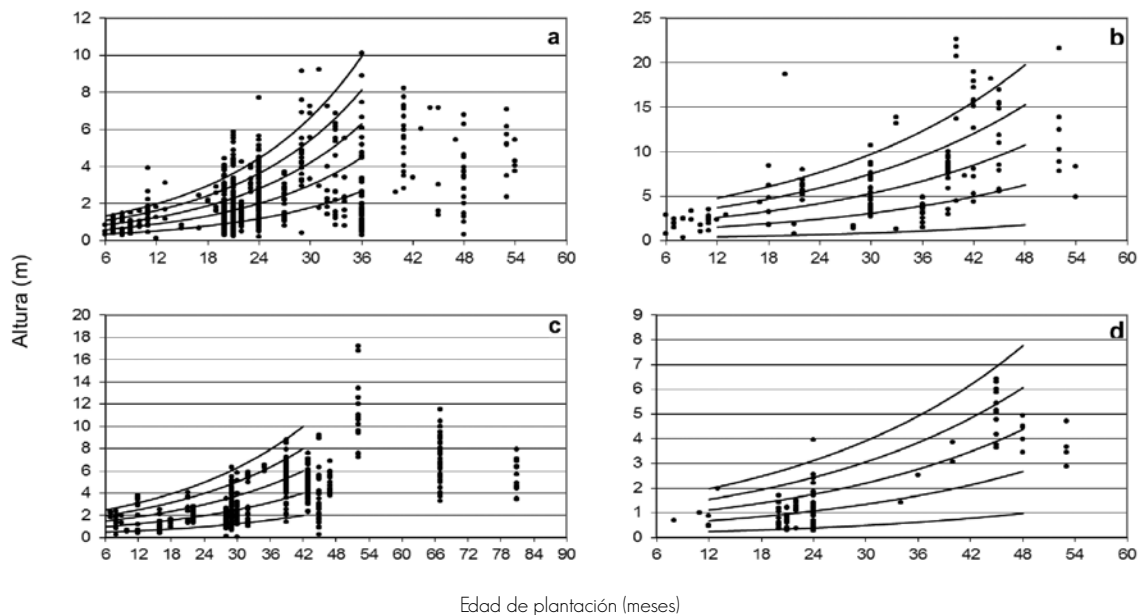


Figura 1. Estimación de calidad de sitio en etapas tempranas de crecimiento de a) *Cedrela odorata*, b) *Gmelina arborea*, c) *Tectona grandis* y d) *Swietenia macrophylla* en plantaciones forestales comerciales en el estado de Veracruz.

Figure 1. Site quality estimation at early stages of growth a) *Cedrela odorata*, b) *Gmelina arborea*, c) *Tectona grandis* and d) *Swietenia macrophylla* in commercial forest plantations in Veracruz state.

Si se desea conocer la calidad de sitio potencial de una plantación joven se requiere medir la altura promedio de los árboles más grandes de la plantación; Wadsworth (2000) menciona que deben medir 100 árboles dominantes y codominantes de una hectárea, además es necesario conocer la edad de plantación. Por ejemplo, si se tiene una de *Cedrela odorata* con 2.5 m de altura promedio de los árboles más grandes y una edad de 24 meses, con la ecuación para *C. odorata* del Cuadro 3 se estima que a los 3 años los árboles tendrán, en promedio, 5.6 m de altura. Estos valores indican que el sitio estaría clasificado entre 4 y 6 m, como sitios de tercera clase.

En Quintana Roo se ha documentado que en la mejor condición de crecimiento los árboles superiores de *Cedrela odorata* alcanzan aproximadamente 5 m a los tres años, lo que coincide con la tercera condición que va de 4.5 a 6.31 m para las plantaciones de Veracruz (García-Cuevas *et al.*, 2007). Las curvas de crecimiento determinadas en plantaciones forestales comerciales de Oaxaca, resultaron similares con un crecimiento promedio a los tres años de 3 m, lo que correspondería a la cuarta categoría obtenida en Veracruz. Lo anterior, muestra que en este estado puede haber mejores condiciones para el crecimiento de *Cedrela odorata*, que en otros estados de la república.

Gmelina arborea presentó la tasa más alta de crecimiento entre las cuatro especies evaluadas. Si se clasificara, de acuerdo con las líneas definidas (Figura 1), en los sitios de primera se esperaría que los árboles dominantes alcanzan alturas de 15.1 a 20 m ó más, a los cuatro años; los sitios de segunda podrían tener de 10.1 a 15 m; los de tercera entre 5.1 y 10 m; y los de cuarta 5 m como máximo. Se han publicado investigaciones que avalan crecimientos de hasta 20 m de altura a los cinco años de edad (Kamal, 1999), y en Indonesia a los 21 meses en dos localidades, con 3.4 a 5 m de altura y la segunda localidad con 1.52 a 3.28 m a la misma edad (Roshetko *et al.*, 2003). Wadsworth (2000) menciona que se logran crecimientos de 3 a 6 m de altura promedio a los tres años de edad, lo que confirma la tendencia mostrada en las evaluaciones realizadas en Veracruz.

Tectona grandis en los sitios de primera, a los tres y medio años después de la plantación, presentaron una altura dominante de 8.1 a 10 m; en los sitios de segunda de 6.1 a 8 m; en los de tercera de 4.1 a 6 m, los de cuarta entre 2.1 y 4 m; y en los de quinta solamente llegaron a 2 m ó menos de altura (Figura 1). Keogh (1979) elaboró un índice de sitio con datos de diversas localidades de América Latina, cuyo valor de altura para la primera categoría a los cinco años fue de aproximadamente 12 m; mientras que en la de Veracruz indica que a 3.5 años puede tener 10 m, en consecuencia es posible que los datos en este último estén sobreestimados. Sin embargo, Pereira *et al.* (2008) señaló que plantaciones de *Tectona*

hold 10.1 a 15 m; the third class between 5.1 and 10 m and the fourth class, 5 m at the most. Research studies have been published that support growths up to 20 m high at 5 years old (Kamal, 1999) and in Indonesia at 21 months in two locations, with 3.4 to 5 m high and the second location with 1.52 to 3.28 m at the same age (Roshetko *et al.*, 2003). Wadsworth (2000) mentioned growths of 3 to 6 m tall, in average at three years old have been achieved, which confirms the tendency of the assessments made in Veracruz.

Tectona grandis, in the sites of first class, three and a half years after it was planted, registered a dominant height of 8.1 to 10 m; in the second class sites, from 6.1 to 8 m; in those of third, from 4.1 to 6 m; those of fourth, between 2.1 and 4 m and in those of fifth, only 2 m or less (Figure 1). Keogh (1979) formulated a site index with the data of several location of Latin America, whose height value for the first category after 5 years was 12 m, while in Veracruz, 10 m can be attained at 3.5 years; thus it is possible that the data of the latter are overestimated. However, Pereira *et al.* (2008) pointed out that first class plantations of *Tectona grandis* had a dominant height of 15 m at 4 years old in Tangara da Serra, Brazil, which could validate the estimation of the data of Veracruz.

Horne (1966) reports that at three years old, *Tectona grandis* grows up to 8 m high in first class sites, corresponding to the second category determined for Veracruz. Wadsworth (2000) highlights that the average growth of teak would be from 2 to 3 m high at three years, which are equivalent to the fourth class determined in the actual study. In Keogh's (1979) fifth class, after five years 5 m high are attained, a number that seems to follow the tendency of the curves determined for Veracruz.

In first class sites it is expected that dominant and codominant trees of *Swietenia macrophylla* get to 7.1 to 9 m tall in average; at four years in second class sites, the expected growths are 5.1 to 7 m; in third class sites, of 3.1 to 5 m and in fourth class, the top growth is 3 m or even less (Figure 1). Wadsworth (2000) reports an average growth for the species at three years of 2 m high that belong to the fourth class determined for Veracruz. In contrast, Guimarães *et al.* (2004) refers growths of 3.45 m in pure plantations at the same age in Brazil. Bauer and Francis (1998), as well, describe heights of 6.5 m in Peru, which places the estimations for Veracruz in an average interval.

CONCLUSIONS

The exponential model had a better fit for the four species, since when the second parameter was eliminated from the exponential association model, it is transformed into the exponential model.

The four equations that were developed allow an approximated assessment of the site quality in young commercial

grandis de primera calidad tuvieron una altura dominante de 15 m a los 4 años de edad, en Tangara da Serra, Brasil, lo que podría validar la estimación de los datos para Veracruz.

Horne (1966) consigna que a los tres años, *Tectona grandis* crece hasta 8 m de altura en sitios de primera calidad, en correspondencia con la segunda categoría determinada para Veracruz. Wadsworth (2000) destaca que el crecimiento promedio de teca sería de 2 a 3 m de altura a los tres años, que, a su vez, son equivalentes a la cuarta categoría determinada en el presente estudio. En la quinta categoría de índice de sitio de Keogh (1979), a los cinco años, se alcanzan 5 m de altura, cifra que parece seguir la tendencia de las curvas determinadas para Veracruz.

En sitios de primera se espera que el promedio de los árboles dominantes y codominantes de *Swietenia macrophylla* tengan de 7.1 a 9 m de altura; a los 4 años de edad en sitios de segunda, los crecimientos esperados son de 5.1 a 7 m; en los sitios de tercera de 3.1 a 5 m; y en los sitios de cuarta el crecimiento máximo en altura es de 3 m ó menores (Figura 1). Wadsworth (2000) documenta un crecimiento promedio para la especie a los tres años de 2 m de altura, que corresponde a la cuarta categoría determinada para Veracruz. En cambio, Guimarães *et al.* (2004) refieren crecimientos de 3.45 m en plantaciones puras a la misma edad, en Brasil. Así mismo Bauer y Francis (1998) describen alturas de 6.5 m en Perú, lo que ubica a las estimaciones para Veracruz en un intervalo promedio.

CONCLUSIONES

El modelo exponencial tuvo el mejor ajuste para las cuatro especies, ya que al eliminarse el segundo parámetro del modelo de asociación exponencial, este se transforma en el modelo exponencial.

Las cuatro ecuaciones desarrolladas permiten evaluar en forma aproximada la calidad de los sitios en las plantaciones forestales comerciales jóvenes de las especies: *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* en el estado de Veracruz.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo recibido por el fondo sectorial CONAFOR- CONACYT 2002 para el proyecto "Plantaciones Forestales Comerciales: Tecnología Productiva para el Golfo Centro de México".

REFERENCIAS

Andenmatten, E. y F. Letourneau. 1997. Funciones de intercepción del incremento, para la predicción de índice de sitio en pino ponderosa, de aplicación en la región Andino Patagónica del Río Negro y Chubut. *Quebracho* 5: 5-9.

forest plantations of *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* in the state of Veracruz.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was made possible from the financial support provided by CONAFOR- CONACYT 2002 sector fund for the "Plantaciones Forestales Comerciales: Tecnología Productiva para el Golfo Centro de México" project.

End of the English version

- Bermejo, I., I. Cañellas and A. San Miguel. 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 189: 97-110.
- Bauer, G. P. and J. K. Francis. 1998. *Swietenia macrophylla* King. Honduras mahogany, caoba. SO-ITF-SM-81. Department of Agriculture Forest Service, New Orleans, LA USA. 7 p.
- Carmean, W. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Advances in Agronomy* 27: 209-269.
- Chen, Y. H., K. Klinkan and R. D. Kabzems. 1998. Site index, site quality, and foliar nutrients of trembling aspen: relationships and predictions. *Can. J. For. Res.* 28 (12): 1743-1755.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley & Sons Inc. New York, NY. USA. 333 p.
- Del Amo R. S. y J. Nieto de Pascual. 1983. Aplicación de ecuaciones y modelos matemáticos en la evaluación de las tasas de crecimiento y determinación de la edad en árboles tropicales. In: Bormann, F. H. y G. Berlyn (Eds.). *Edad y tasa de crecimiento de los árboles tropicales*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Compañía Editorial Continental. México, D. F. México. pp. 133-138.
- Ferree, M. J., T. D. Shearer and E. L. Stone Jr. 1958. A method of evaluating site quality in young red pine plantations. *Journal of Forestry*. 56 (5): 328-332.
- Fontes, L. M. Tomé, F. Thompson, A. Yeomans, J. Sales L., and P. Savill. 2003. Modelling the Douglas- Fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) site index from site factors in Portugal. *Forestry*. 76 (5): 491-507.
- García-Cuevas, X., J. G. Flores Garnica y J. de D. Benavides-Solorio. 2007. Índices de sitio para *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) en Quintana Roo, México. *Rev. Cien. For. en Méx.* 32 (101): 71-92.
- Guimarães N., A. B., J. M. Felfili, G. Fernandes da S., L. Mazzei, C. William F. e P. E. Nogueira. 2004. Avaliação do plantio homogêneo de mogno (*Swietenia macrophylla* King), em comparação com o plantio consorciado com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blke, após 40 meses de idade. *Árvore, Viçosa-MG*. 28 (6): 777-784.
- Heiberg, S. O. and D. P. White. 1956. A site evaluation concept. *Journal of Forestry*. 54 (1): 7-10.
- Herrera, B. y A. Alvarado. 1998. Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. *Agronomía Costarricense* 22 (1): 99-117.
- Horne, J. E. M. 1966. Teak in Nigeria. *Nigerian Forestry Information Bulletin (New Series)* No. 16. 38 p.
- Huang, S. and S. J. Titus. 1993. An index of site productivity for uneven-age or mixed-species stands. *Can. J. For. Res.* 23 (3): 558-562.
- Husch, B., C. I. Miller and T. W. Beers. 1972. *Forest mensuration*. 2nd. Edition. The New Ronald Press. New York, NY. USA. 410 p.

- Kamal H., M. 1999. *Gmelina arborea*: a popular plantation species in the tropics. Fact Sheet 99-05. Forest, Farm, and Community Tree Network. USA. 3 p. <http://www.winrock.org/frnm/factnet/factpub/FACTSH/Gmelina%20arboreal.pdf> (16 de julio de 2008).
- Keogh, R. M. 1979. El futuro de la teca en la América tropical. *Unasylva*, 31 (126): 13-19.
- MacFarlane, D. W., E. J. Green and H. E. Burkhart. 2000. Population density influences assessment and application of site index. *Can. J. For. Res.* 30 (9): 1472-1475.
- Mendoza B., M. A. 1993. Conceptos básicos de manejo forestal. Limusa. México, D. F. México. 161 p.
- Montero, M. y M. Kanninen. 2003. Índices de sitio para *Terminalia amazonia* en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 27 (1): 29-35.
- Onyekwelu, J. C. and J. C. Fuwape. 1998. Site index equation for *Gmelina arborea* pulp wood plantations in Oluwa forest reserve, Nigeria. *Journal of Tropical Forest Science*. 10 (3): 337-345.
- Otarola, E., L. Freitas, C. Linares, y J. Baluarte. 2001. Estimación de la calidad de sitio mediante "Índices de sitio" para (*Cedrelinga catenaeformis* Duck (Torrillo) En plantaciones de Jenaro Herrera, Loreto (Perú). *Folia Amazónica*. 12 (1-2): 39-52.
- Pereira da C., J., H. Garcia L., C. P. Boechat S., J. C. Chagas C., L. Smit, G. Saraiva N. e M. L. Romarco de O. 2008. Modelos de crescimento e produção para plantios comerciais jovens de *Tectona grandis* em Tangará da Serra, Mato Grosso. *Árvore, Viçosa M-G*. 32 (5): 821-828.
- Quintero-Castañeda, H., C. Flores-López, E. H. Cornejo-Oviedo, J. I. Valdés-Hernández y J. Morales-Hernández. 2005. Crecimiento de *Cedrela odorata* L. en plantaciones en San José Chacalapa, Pochutla Oaxaca. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México. pp. 287-292 http://www.uaaan.mx/DirInv/ResuPI-04/MEMORIA_2004/RecursosForestales/CFloresLopez-2.doc (2 de julio de 2008).
- Roshetko, J., M. Mulawarman and P. Purnomosidhi. 2003. *Gmelina arborea* - A viable species for smallholder tree farming in Indonesia? In: Dvorak, W. S., G. R. Hodge, W.C. Woodbridge and J. L. Romero. (Eds.). Recent Advances with *Gmelina arborea*. CD-ROM CAMCORE, North Carolina State University. USA. 10 p. <http://www.worldagroforestry.org/sea/Publications/files/paper/PP0137-05.PDF> (16 de julio de 2008)
- Splechna, B. E. 2001. Height growth and site index models for Pacific silver fir in Southwestern British Columbia. B. C. *Journal of Ecosystem and Management* 1 (1): 1-14.
- Statistical Analysis System (SAS). 2000. SAS Online Doc, Versión 8. Raleigh, NC USA. <http://www.okstate.edu/sas/v8/sashtml/main.htm> (17 de julio de 2008).
- Upadhyay, A., T. Eid and P. L. Sankhayan. 2005. Construction of site index for even stands of *Tectona grandis* from permanent plot data in India. *Forest Ecology and Management* 212: 14-22.
- Wadsworth, F. H. 2000. Producción forestal para América tropical. Manual de Agricultura 710-S. Servicio Forestal. Departamento de Agricultura de los EE.UU. Washington, DC USA 581 p.
- Wang, G. G. 1998. Is height of dominant trees at a reference diameter an adequate measure of site quality? *Forest Ecology and Management*. 112 (1-2): 49-54.
- Woodard, S. 1997. Estimating site productivity on your woodland. The Woodland workbook. EC 1128. Oregon State University Extension Service. Corvallis, OR. USA. 4 p.