

ÍNDICE DE SITIO PARA *Terminalia amazonia* EN COSTA RICA¹

Marcelino Montero,^{2/*} Markku Kanninen^{**}

Palabras clave: *Terminalia amazonia*, modelos, índice de sitio, plantaciones, Amarillón, Roble coral, Costa Rica.

Keywords: *Terminalia amazonia*, models, site index, plantations, Amarillón, Roble coral, Costa Rica.

RESUMEN

Se presenta los resultados del ajuste de modelos para la predicción del índice de sitio para *Terminalia amazonia* a partir de la relación altura dominante:edad en parcelas en crecimiento en Costa Rica. Se ajustó los modelos de Chapman-Richards y Schumacher; la selección del mejor modelo se realizó utilizando el coeficiente de determinación ajustado (r^2 ajustado) y la observación gráfica de las curvas con los datos observados, y la variancia del índice de sitio. Esto permitió seleccionar entre los modelos anamórficos y polimórficos de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards; éste último fue el que presentó mejor ajuste. Por lo tanto el índice de sitio para *T. amazonia* en Costa Rica se puede estimar con mayor precisión con el modelo de intercepto común de Chapman-Richards, con el cual se puede generar curvas polimórficas. Con el modelo seleccionado, se calculó el parámetro "c", que permitió generar la familia de curvas de los datos observados. El modelo seleccionado representa una herramienta que brinda la posibilidad de clasificar los sitios, por medio de la estimación del crecimiento en altura que podría tener *T. amazonia* en un sitio dado, por lo que los posibles usuarios tendrán la responsabilidad y criterio del uso del modelo propuesto en esta investigación.

ABSTRACT

Site index for *Terminalia amazonia* at Costa Rica. Results include models for the prediction of Site Index from dominant height and age for *Terminalia amazonia* in Costa Rica. The fitted models were those of Chapman-Richards and Schumacher; the best-fit model was selected using the criteria of adjusted- r^2 and visual assessment of trend lines against observed data, as well as the Site Index variance. Chapman-Richards model presented better fit than that of Schumacher. Therefore, the Site Index for *Terminalia amazonia* in Costa Rica can be estimated with higher precision with the common intercept of Chapman-Richards, which can be used to develop polymorphic curves. With the selected model a "c" parameter was calculated to generate the curves representing the observed data. The selected model represents a tool, which makes it possible to classify the sites through an estimate of the increase in height, which *T. amazonia* could have in a given site. Thus, possible users should have the responsibility and criteria about the model proposed in this work.

1/ Recibido para correspondencia el 17 de mayo del 2002.

2/ Autor correspondencia. Correo electrónico: mmontero@catie.ac.cr

* Dinámica de Plantaciones, Universidad de Helsinki, Finlandia/CATIE, Centro Agronómico Tropical de

Investigación y Enseñanza. CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica.

** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: kanninen@catie.ac.cr

INTRODUCCIÓN

Terminalia amazonia (Gmel.) Excell es una especie con un gran potencial de crecimiento, ésta crece en colinas y planicies costeras, en suelos rojos o amarillos, lateríticos profundos, derivados de materiales aluviales o ígneos (Nichols y González 1992, Flores 1994, CATIE 1997).

En Costa Rica ésta especie se localiza en la zona Norte, desde Upala hasta Sarapiquí y en la zona Sur se distribuye en toda la región. En Potrero Grande de Buenos Aires se presenta como una especie dominante de los bosques naturales. Esta especie se encuentra en las condiciones climáticas: bosque húmedo premontano, bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical, en elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 1100 m, con temperaturas anuales entre 21–24°C, y precipitaciones anuales entre 2000 y 4500 mm por año. La especie tolera hasta 4 meses de sequía (Prado 1991, Nichols 1994).

En la última década, las plantaciones de ésta especie se han incrementado en una gran diversidad de sitios en la zona Sur y en menor cantidad en el Norte de Costa Rica. A pesar de su facilidad de adaptación, su productividad podría mejorarse en gran medida mediante una selección de sitio adecuada.

Este trabajo está dirigido hacia la búsqueda de herramientas prácticas como es el índice de sitio, para el manejo silvicultural de las plantaciones de *T. amazonia* en Costa Rica, con lo cual se pretende que se facilite la clasificación de áreas para su manejo.

La investigación presenta los resultados del ajuste de modelos para la predicción del índice de sitio a partir de la relación altura dominante:edad en parcelas en crecimiento en Costa Rica. La selección del mejor modelo se realizó utilizando el coeficiente de determinación ajustado (r^2 ajustado) y la observación gráfica de las curvas con los datos observados y la variancia del índice de sitio para seleccionar entre los modelos anamórficos y polimórficos de Schumacher y Chapman-Richards.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material vegetal para este estudio, consistió de un total de 3361 árboles dominantes, los cuales fueron seleccionados con el criterio de los 100 árboles más altos en 1 ha, provenientes de 843 parcelas; el número de individuos varió con relación al área de la parcela al equipararla a 1 ha. Se utilizó 19 parcelas establecidas por la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR) ubicada en Sarapiquí, Heredia, al noroeste de la provincia de Heredia, también se trabajó con los datos de otras 9 parcelas (Montagnini *et al.* 1995), ubicadas en la estación biológica La Selva, de la Organización para Estudios Tropicales (OET). Las restantes 815 parcelas provienen de CoopeAgri, CoopeUvita, CoopeASSA, Centro Agrícola de Pérez Zeledón, Asociación de Desarrollo de Sabanilla, Asociación de Reforestadores de Colorado de la zona Sur, provincia de Puntarenas, Costa Rica. Estas parcelas se encuentran distribuidas en toda la región Sur en diferentes condiciones fisiográficas, edáficas y climáticas.

El área punteada en las provincias de Heredia y Puntarenas de la figura 1 muestra aproximadamente la zona de estudio donde están ubicadas las parcelas utilizadas.

El tamaño de las parcelas varió en cada zona, desde 314 hasta 1215 m², al igual que el manejo dado, el espaciamiento promedio es de 3 x 3 m. En cada parcela se midió los diámetros y las alturas de los árboles.

Las parcelas de la zona Norte están distribuidas en suelos arcillosos a franco arcillosos con un pH de 4,2-6,2; Ca 0,2-19,3; Mg 0,12-6,8; K 0,04-0,9; P 1,1-30,6, todos estos elementos en cmol(+); el N entre 0,23 y 0,76; mientras que el contenido de M.O. fue de 4,4 a 18,3%.

En el cuadro 1 se presenta algunas características fisiográficas y estadísticas descriptivas de las parcelas utilizadas para ajustar los modelos de índice de sitio para la especie.

La información se analizó usando el programa SYSTAT 10. Por regresión no lineal se exploró el ajuste de los modelos de Schumacher y



Fig. 1. El área punteada muestra la distribución aproximada de las plantaciones de *Terminalia amazonia* en Costa Rica.

Chapman-Richards (Clutter *et al.* 1983), para seleccionar el modelo que mejor representara la relación altura:edad y pudiera predecir el índice de sitio.

Modelo de Schumacher

$$\ln Hd = a + (b/e^c) \quad (1)$$

Modelo de Chapman-Richards

$$Hd = a * [1 - \exp(-b * e^c)]^c \quad (2)$$

Donde:

$\ln Hd$ = logaritmo natural de la altura dominante

e = edad (años)

a, b, c = parámetros a estimar

Fierros y Ramírez (1989), indican que las ecuaciones de índice de sitio pueden usarse para predecir la altura en función de la altura dominante promedio, la edad y el mismo índice de sitio. Estas ecuaciones pueden generarse por distintos métodos, pero no todas producen curvas en las que la altura a la edad base es igual al índice de sitio.

Existe una serie de criterios para la selección del mejor modelo (Campos 1989); en este caso se realizó con base en los estimadores estadísticos obtenidos del análisis de regresión, comparando los coeficientes de determinación ajustados (r^2 ajustados) de cada modelo, el valor más alto o más cercano a 1 entre ambos, también se realizó el análisis de residuos para determinar si los datos presentaban una distribución normal. Además, gráficamente, con el comportamiento de las 2 curvas vs. los datos observados. Se seleccionó aquel modelo que produjera la menor discrepancia entre los valores observados y las curvas producidas por el modelo.

Con los modelos se calculó los índices de sitio para comparar los valores estimados entre ambos a una edad base de 10 años. La selección de la edad base parte de que el turno de corta de la especie será de 20 años.

Una vez seleccionado el modelo se procedió a generar la familia de curvas a una edad base de 10 años, el intervalo entre cada curva se realizó tomando en cuenta la desviación estándar presentada al calcular los índices de sitio para cada parcela.

Cuadro 1. Características fisiográficas y estadísticas descriptivas de las parcelas de *Terminalia amazonia* en Costa Rica.

	Mínimo	Promedio	Máximo
Precipitación*	2000	3500	5000
Temperatura*	21°C	24°C	28°C
Elevación (msnm)	30	728	1140
Pendiente (%)	0	32	72
Edad (años)	1,0	5,4	28
IMAdap (cm)	0,4	1,7	4,3
IMAh (m)	0,4	1,4	4,8
Hd (m)	1,6	9,6	36,4

* Precipitación y temperatura media anual.

IMAdap= incremento medio anual en diámetro.

IMAh= incremento medio anual en altura.

Hd= altura dominante.

Para desarrollar la familia de curvas se utilizó la metodología descrita por Clutter *et al.* (1983), del modelo general (2) para derivar los modelos siguientes:

Modelo de Chapman-Richards

$$Hd = a * [1 - \exp(-b * e)]^c \quad (2)$$

Donde:

Hd= altura dominante

e= edad (años)

a,b,c= parámetros a estimar

Curvas anamórficas (Pendiente común)

Manteniendo fijos los parámetros “b” y “c”, la variación estará en función del parámetro “a”:

$$a = Hd / [1 - \exp(-b * e)]^c \quad (3)$$

Con el modelo 3 se calcularon los valores de “a” con la ayuda de la desviación estándar que muestran los índices de sitio calculados, con el modelo 4 se elige la diferencia entre una curva y otra y así se genera las curvas anamórficas.

El índice de sitio se puede calcular con el modelo 4:

$$IS = Hd * \{ [1 - \exp(-b * e_b)] / [1 - \exp(-b * e)] \}^c \quad (4)$$

Donde:

IS= índice de sitio

e_b= edad base en años

Curvas polimórficas (Intercepto común)

Manteniendo fijos los parámetros “a” y “b” con el modelo 5 se consigue variar el valor del parámetro “c” y de la misma forma como se realizó con las curvas anamórficas, se selecciona las diferencias entre cada curva polimórfica a generar.

$$C = \ln(Hd/a) / \ln [1 - \exp(-b * e_b)] \quad (5)$$

El índice de sitio se puede calcular con el modelo 6:

$$IS = a * \{ [1 - \exp(-b * e_b)] \}^{\ln(Hd/a) / \ln [1 - \exp(-b * e)]} \quad (6)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se muestra el diagrama de dispersión de la altura dominante, en relación con la edad de los 843 promedios de alturas dominantes, de las parcelas utilizadas en el ajuste de los modelos de índice de sitio. La dispersión de los pares de datos edad:altura, no representa valores extremos o alejados que sesgue el ajuste de los modelos.

La concentración de datos (edad:altura) disminuye a partir de los 12 y hasta los 20 años, donde fue difícil encontrar plantaciones que cubrieran ese ámbito de edad.

El ajuste de los modelos 1 y 2 se realizó a través de regresión no lineal. En la figura 3 se presenta la prueba de normalidad de los datos, donde se observa que los 2 modelos presentan

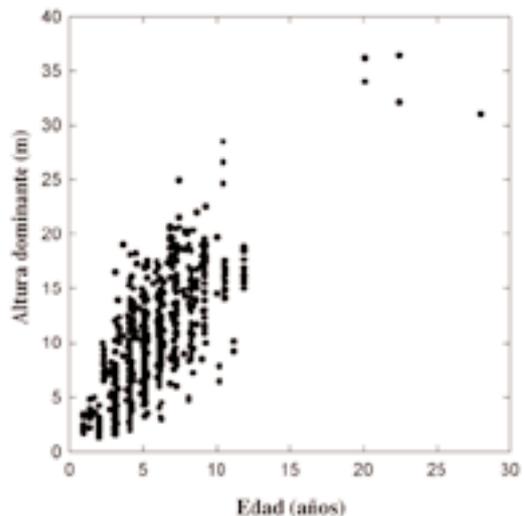


Fig. 2. Dispersión de los datos de altura:edad observados en *Terminalia amazonia* en Costa Rica.

Cuadro 2. Análisis de regresión para los modelos 1 y 2.

	Parámetro estimado	Desviación estándar	Intervalos de confianza		r ²	r ² ajustado
			bajo <	> alto		
Modelo 1						
a	6,106	1,427	3,307	8,905	0,96	0,46
b	-5,500	1,356	-8,159	-2,841		
c	0,200	0,070	0,062	0,338		
Modelo 2						
a	47,835*	5,629	36,799	58,871	0,89	0,50
b	0,050*	0,009	0,032	0,068		
c	1,100**	0,047	1,007	1,194		

Los parámetros del modelo 1 no fueron significativos estadísticamente, contrario a los del modelo 2, donde los parámetros “a” y “b” son significativos al 95% (*), y el “c” al 99% (**).

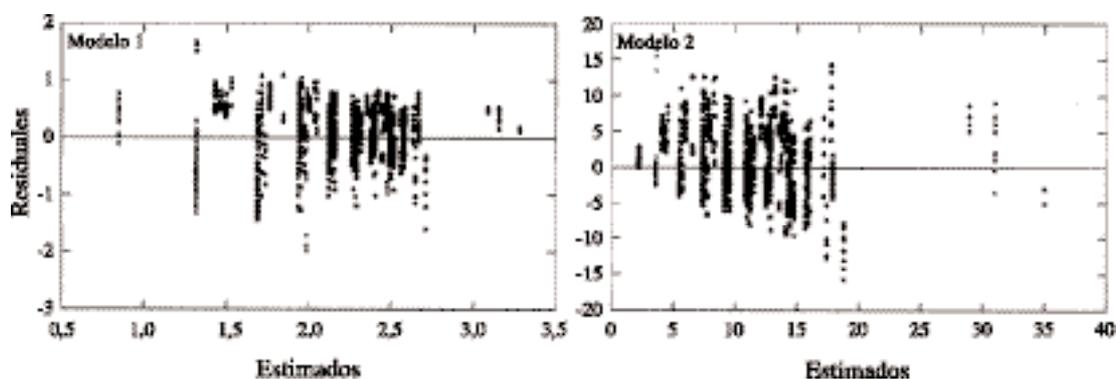


Fig. 3. Prueba de normalidad de los datos para los Modelos 1 y 2.

una distribución normal, lo que se espera para un buen ajuste de los modelos.

Al comparar los coeficientes de determinación ajustados (r² ajustado), obtenidos para los 2 modelos (Cuadro 2), se observa que el modelo 2 tiene un valor mayor al del modelo 1, por lo que se podría concluir que el modelo 2 muestra un mejor ajuste. Sin embargo, también se consideró la desviación estándar que presentan los parámetros, la cual es menor en el modelo 2.

Al graficar las 2 curvas de cada modelo, se observa que el modelo 2 representa mejor el conjunto de datos y ofrece una mejor estimación en el cálculo del índice de sitio para las plantaciones observadas y sobre todo de las alturas a edades mayores de 20 años (Figura 4).

Otro de los criterios de selección del modelo, fue la comparación de los valores de índice de sitio a la edad base (10 años), calculados con

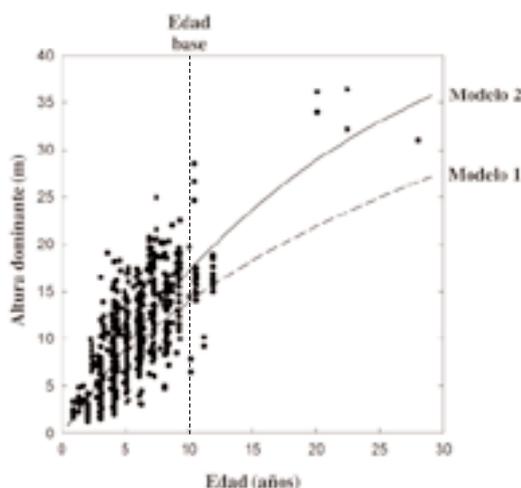


Fig. 4. Curvas de índice de sitio de los modelos ajustados con los datos observados de *Terminalia amazonia* en Costa Rica.

los modelos generados, que transformados algebraicamente (Alder 1980), permitieron el cálculo de los índices de sitio para cada una de las parcelas, estos modelos son los siguientes:

Con el modelo de Schumacher el índice de sitio se calculó con el modelo 7 anamórfico y el polimórfico con el modelo 8:

$$IS = \exp\{\ln Hd + b * [(1/e^c) - (1/e_b^c)]\} \tag{7}$$

$$IS = \exp[a + (\ln Hd - a) * (e/e_b)^c] \tag{8}$$

Mientras que para el modelo 2, el índice de sitio se calculó con los modelos 4 y 6 de Chapman-Richards.

La variación del cálculo del índice de sitio, con los modelos 4, 6, 7 y 8 se muestra en el cuadro 3, en el cual se observa que el modelo 6 presenta la menor desviación estándar y de igual manera el coeficiente de variación, por lo que este modelo de intercepto común estima con mayor precisión el índice de sitio de *T. amazonia* a diferentes edades de una misma parcela.

Los resultados anteriores muestran que el modelo que mejor ajuste presentó fue el de Chapman-Richards (modelo 2). El cual estaría mostrando la curva guía, como punto de partida para crear la familia de curvas que represente los datos observados, cuyo índice de sitio se puede estimar con mayor precisión con el modelo 6 de intercepto común, el cual generaría curvas polimórficas de índice de sitio para *T. amazonia*.

El modelo 2 para generar la curva guía sería de la siguiente manera:

$$Hd = 47,835 * [1 - \exp(-0,050 * e)]^{1,1}$$

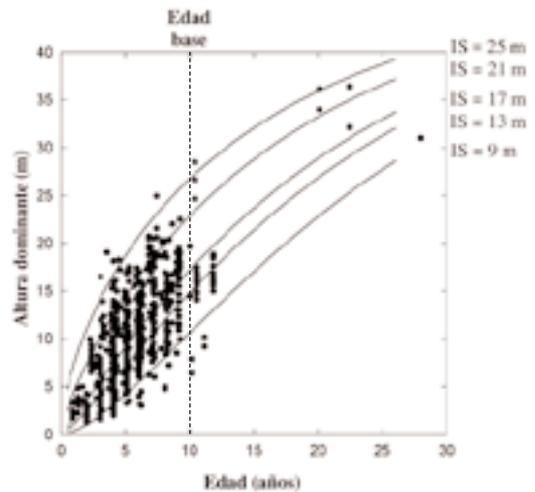


Fig. 5. Curvas de índice de sitio para *Terminalia amazonia* en Costa Rica, según el modelo polimórfico a la edad base de 10 años.

Y el modelo 6 para calcular el índice de sitio:

$$IS = 47,835 * \{ [1 - \exp(-0,050 * 10)] \}^{\{ \ln(Hd/47,835) / \ln[1 - \exp(-0,050 * e)] \}}$$

Para generar la familia de curvas polimórficas se usó el modelo 2, variando el parámetro “c” y manteniendo fijos los parámetros “a” y “b”. Con la ayuda de la desviación estándar (4,02) del modelo 6, que permite la diferencia entre una curva y otra, se calculó los diferentes valores de “c”, los cuales facilitaron la construcción de las curvas (Figura 5). Estas se construyeron para un ámbito de índice de sitio de 9-25 m.

Cuadro 3. Valores de índice de sitio calculados a la edad base de 10 años con los diferentes modelos aplicados.

	Valor mínimo calculado (m)	Valor máximo calculado (m)	Promedio de los valores calculados	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Modelo 4	2,3	42,1	17,2	6,91	0,402
Modelo 6	3,5	28,5	16,8	4,02	0,239
Modelo 7	2,0	35,8	15,2	5,98	0,393
Modelo 8	2,7	39,2	14,9	5,07	0,339

CONCLUSIONES

Al comparar los modelos, el de Chapman-Richards presentó mejor ajuste que el modelo de Schumacher para los datos de edad:altura dominante para estimar los índice de sitio de *T. amazonia* en Costa Rica.

El índice de sitio para *T. amazonia* se puede estimar con mayor precisión con el modelo de intercepto común, con el cual se puede generar curvas polimórficas.

A través del modelo de Chapman-Richards, su manipulación y el uso de la desviación estándar y el cálculo del parámetro “c”, se generó la familia de curvas con el modelo de intercepto común, el cual representa con mayor precisión los datos observados de *T. amazonia* en Costa Rica.

El modelo seleccionado es una herramienta que brinda la posibilidad de clasificar los sitios por medio de la estimación del crecimiento en altura que podría tener *T. amazonia* en un sitio dado. Por lo tanto, los posibles usuarios tendrán la responsabilidad y criterio del uso del modelo propuesto en esta investigación.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan sinceros agradecimientos a la Academia de Finlandia por el financiamiento del presente trabajo, a todas las cooperativas reforestadoras de la zona Sur y en especial a Luis Salazar (CoopeAgri R.L.), a German Obando (FUNDECOR) y a Florencia Montagnini (Universidad de Yale) por el suministro de datos de campo, a Alvaro Vallejo (CATIE) por la revisión del documento.

LITERATURA CITADA

- ALDER D. 1980. Forest volume estimation and yield prediction. Vol. 2. Yield prediction. FAO Forestry Paper 22/2. Roma. 194 p.
- CAMPOS A.J.J. 1989. Curvas de índice de sitio para *Eucalyptus camaldulensis* en América Central. In: Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala) manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. Ed. by Rodolfo Salazar. CATIE, Turrialba, Costa Rica. p. 351-365.
- CATIE. 1997. *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell. Nota técnica sobre manejo de semillas forestales N° 10. Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- CLUTER J.L., FORTSON J.C., PEINARL.V., BRISTER H.G., BAILEY R.L. 1983. Timber Management: a quantitative approach. New York, Wiley. 333 p.
- FIERROS G.A., RAMIREZ M.H. 1989. Índice de sitio para *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* en “La Sabana”, Oaxaca, México. In: Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala) Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. Ed. by Rodolfo Salazar. CATIE, Turrialba, Costa Rica. p. 441-457.
- FLORES E. 1994. Roble coral. In: Árboles y semillas del Neotrópico. San José, Costa Rica. 3(1): 55-86.
- MONTAGNINI F., GONZALEZ E., PORRAS C. 1995. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. Commonwealth Forestry Review 74(4): 306-314.
- NICHOLS D. 1994. *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell: development of native species for reforestation and agroforestry. Commonwealth Forestry Review 73(1):9-13.
- NICHOLS D., GONZALEZ E. 1992. Especies nativas y exóticas para la reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. San José, Costa Rica. 84 p.
- PRADO R. 1991. Proyecto de reforestación para pequeños y medianos agricultores de la Región Brunca. Dirección General Forestal, San Isidro del General, Costa Rica. p. 19-20.

