

¿Cómo generar modelos de índice de sitio?

Jenny Salgado¹

Resumen

Los modelos de índice de sitio permiten evaluar y clasificar los sitios forestales, según la capacidad de producción de la especie forestal plantada. Básicamente, estos modelos parten de la evaluación y estimación de la altura que pueden alcanzar los árboles dominantes o codominantes sanos a una edad de referencia establecida. El objetivo general del estudio fue diseñar un modelo de índice de sitio a partir del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L.F.). Para ello, se utilizaron datos de mediciones repetidas, provenientes de parcelas permanentes de muestreo (PPM) en plantaciones de teca establecidas en varias zonas de Guatemala. Se utilizaron los modelos lineales mixtos ajustando el modelo Schumacher, para analizar la relación de la altura dominante con la edad en plantaciones y crear curvas de índice de sitio para la especie.

Palabras clave: *Tectona grandis*; árboles forestales; producción forestal; índice de sitio; índice de crecimiento; modelos lineales; Guatemala

Abstract

Generation of site index models. The site index models help in the evaluation and classification of forest sites, according to the productive capacity of the forest species. Basically, these models are rooted on the determination of height that healthy dominant and co-dominant trees may reach at a given age. The objective of this study was to design a site index model from growth of young teca (*Tectona grandis* L.F.) stands. Repeated measurements from permanent plots in teca stands were considered to build the model. These plantations were established in different regions in Guatemala. The Schumacher model was adjusted to determine the relation between dominant height and age of the stand, and to define site index curves for the species.

Keywords: *Tectona grandis*; forest trees; forestry production; site index; growth rate; linear models; Guatemala.

¹ Proyecto CATIE - Finnfor. jsalgado@catie.ac.cr

Introducción

Los dispositivos de monitoreo forestal han sido utilizados con el fin de generar información para el desarrollo de modelos cuantitativos que permitan evaluar aspectos relacionados con el desarrollo, productividad y dinámica de crecimiento de las especies en las plantaciones forestales y orientar el manejo forestal sostenible (Marmillod 2012). Las parcelas permanentes de monitoreo forestal (PPM) son los dispositivos más utilizados actualmente en Centroamérica, ya que generan información permanente del estado de la plantación, principalmente en cuanto al crecimiento de las especies.

En Guatemala, al implementarse el Programa de incentivos forestales (Pinfor), a partir del año 1997, el Instituto Nacional de Bosques (INAB) estableció parcelas permanentes en plantaciones forestales por medio de la metodología ‘manejo de información sobre recursos arbóreos en el componente de silvicultura’ (Mirasilv), desarrollada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Tales parcelas siguen siendo monitoreadas por la Sección de Seguimiento y Evaluación de Plantaciones Forestales y Bosque Natural del INAB (Cojom 2008). El objetivo general del estudio fue diseñar un modelo de índice de sitio a partir del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L.F.) establecidas por Pinfor en varias regiones de Guatemala.

El índice de sitio es una medida del potencial de producción de una especie forestal en un sitio específico, en donde a mejor calidad de sitio mayor será su producción (Clutter *et al.* 1983). Un modelo de índice de sitio permite cuantificar el potencial de producción en cada rodal evaluado, definir la calidad del sitio desde excelente hasta muy pobre y realizar comparaciones entre ellos.

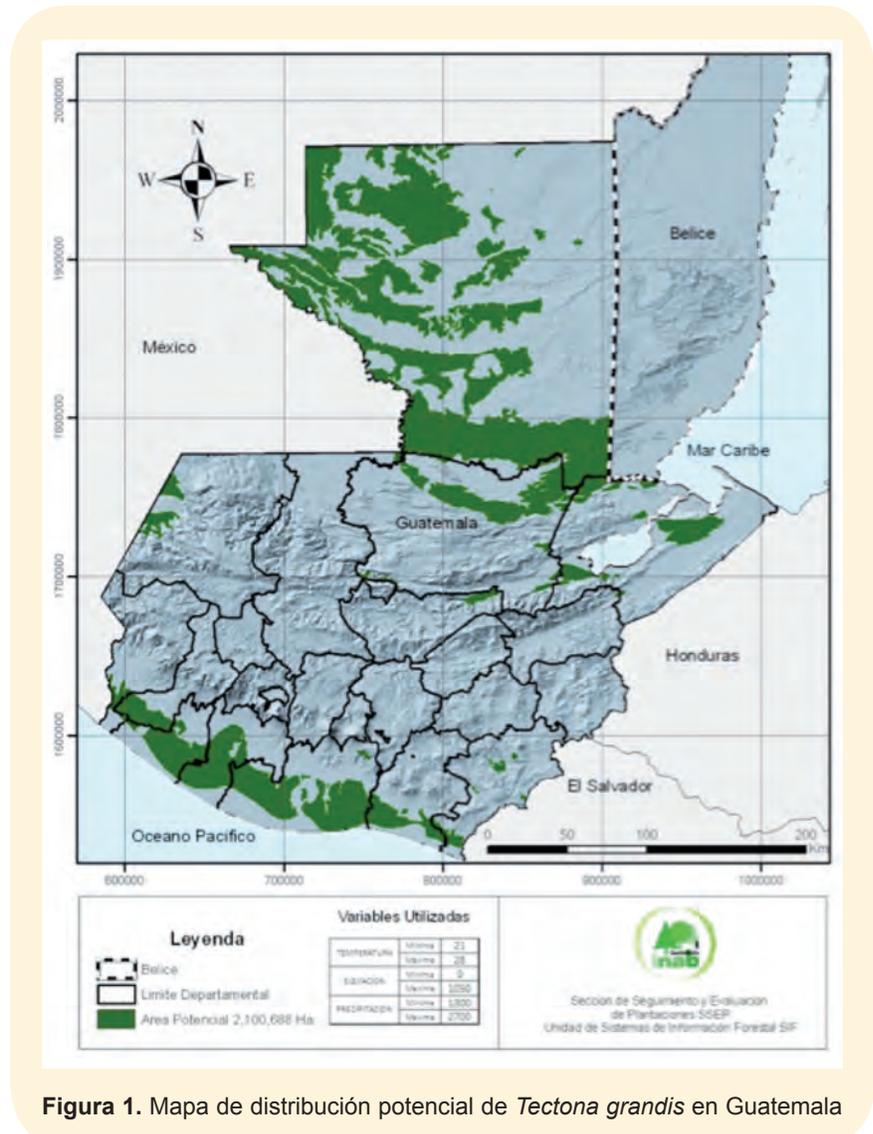


Figura 1. Mapa de distribución potencial de *Tectona grandis* en Guatemala

Los modelos de índice de sitio permiten evaluar y clasificar los sitios forestales, según la capacidad de producción de la especie forestal plantada. Básicamente, estos modelos consisten en evaluar y estimar la altura que pueden alcanzar los árboles dominantes o codominantes sanos a una edad de referencia establecida. En el crecimiento de una especie en un lugar dado influyen muchos factores, y tratar de determinar el efecto de cada uno de esos factores en la calidad de un sitio es aún más complejo (Mora y Meza s.f.). Según Vanclay (1994), la vegetación por sí sola refleja la

mayoría de los factores del sitio; asimismo, el crecimiento de rodales monoespecíficos y coetáneos refleja con precisión la productividad del sitio.

Comúnmente, los métodos de predicción parten de la altura a una edad conocida, la cual permite estimar el índice de sitio o el volumen de producción esperado. Si existen árboles en el rodal lo suficientemente grandes como para reflejar el máximo potencial en altura de la especie de interés, la altura del rodal puede ser usada como un estimador de la productividad del sitio (Vanclay 1994).

Una dificultad de usar datos de altura total del árbol es la visibilidad de las copas. La teca es una especie caducifolia que permite obtener mediciones de la altura total bastante exactas, especialmente durante la época en que las copas están sin hojas (Mora y Meza s.f.). Otros problemas pueden deberse a la presencia de árboles emergentes, cosecha de los árboles más altos y los daños causados por el viento sobre las copas de los árboles (Vanclay 1994).

Desarrollo de modelos de índice de sitio

La metodología Mirasilv utiliza parcelas permanentes de evaluación forestal de forma rectangular, con un área de 500 m² (20 x 25 m), en donde se miden todos los individuos plantados. Algunas PPM cuentan con hasta ocho mediciones, pero

otras solo han sido medidas una vez. En el análisis se consideraron parcelas que tuvieran al menos tres mediciones.

Las PPM se encuentran distribuidas en todos los departamentos del país. Para la generación del modelo de índice de sitio se incluyeron datos de 363 mediciones correspondientes a mediciones repetidas de 72 parcelas. Estas parcelas se ubican en cuatro regiones de Guatemala (Costa sur, Nororiente, Petén y Verapaces), identificadas por el INAB como áreas de distribución potencial de la teca (color verde en el mapa de la Figura 1).

A partir de los datos tomados en campo a nivel de árbol, para cada una de las parcelas se calcularon las siguientes variables a nivel de rodal. Dicha información se utilizó luego en la construcción de los modelos de índice de sitio:

- Diámetro a la altura al pecho (dap) promedio por parcela. En el caso de árboles con más de un fuste (bifurcados), el dap se calculó por medio del diámetro cuadrático medio
- Altura dominante (Hd), definida como el promedio de la altura de los 100 árboles más altos (dominantes en altura) por hectárea
- Número de árboles por hectárea
- Edad del rodal en años (T)
- Área basal por hectárea
- Área de cada parcela
- Fecha de plantación

Para efectos de este estudio se consideró el índice de sitio como la altura promedio de los árboles dominantes (100 árboles/ha) a una edad de referencia, que en este caso se definió en diez años.

Datos incluidos en el análisis

Para el cálculo del índice de sitio, solo se utilizaron datos de parcelas antes de ser intervenidas o aprovechadas debido a que se encontraron señales de intervenciones, de las cuales no se tenía información al inicio. En la Figura 2 se muestran los datos incluidos en el análisis; cada punto corresponde a un valor de altura dominante (Hd) por rodal y las líneas unifican los datos por parcela. Se encontraron datos de Hd de hasta de 26 m en parcelas con edades de hasta 13,6 años (Cuadro 1).

Desarrollo del modelo

Un modelo comúnmente usado para estimar los índices de sitio fue propuesto por Schumacher (1939). Este es un modelo lineal que permite la estimación de una familia de curvas para relacionar la altura con la edad mediante el ajuste de la ecuación:

$$\ln(Hd) = \beta_0 + \beta_1 T^{-1} + \varepsilon$$

Donde: Hd= altura dominante del rodal a la edad T; T= edad del rodal

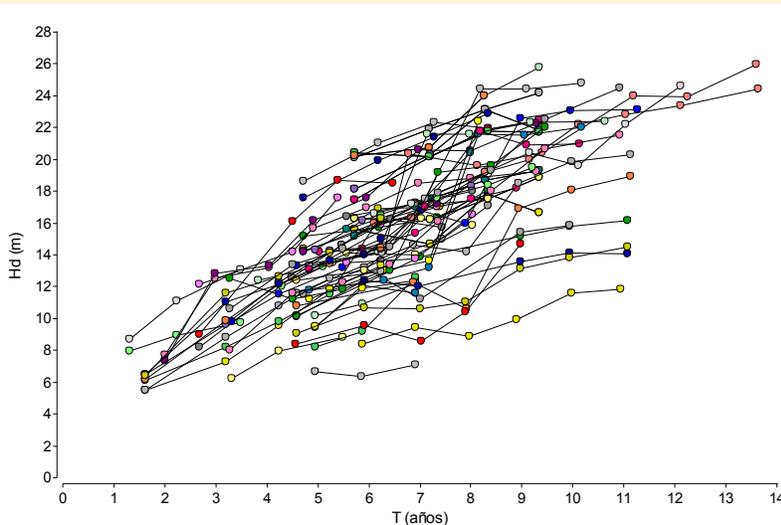


Figura 2. Datos de PPM incluidas en el modelo

Cuadro 1. Medidas resumen de las variables incluidas en los análisis a nivel de rodal

Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Edad	363	6,7	2,3	34,2	1,3	13,6
Hd	361	15,5	4,8	31,1	3,2	26,0
Dap	363	15,2	6,2	40,5	2,0	40,2

Cuadro 2. Modelos seleccionados para la variable respuesta 'altura dominante'

Nombre modelo	Efectos fijos	Efectos aleatorios	Heterocedasticidad	Estructura de correlación
Modelo.1	T-1	Parcela	No	No
Modelo.2	T-1	Parcela	VarPower	No

Cuadro 3. Criterios para la comparación de modelos analizados

	df	AIC	BIC	logLik	Prueba	Razón L.	Valor p
Modelo. 1	4	-251,14	-235,89	129,57			
Modelo. 2	5	-340,94	-321,88	175,47	1 vs 2	91,8	<0,0001

AIC: criterio de información de Akaike; BIC: criterio de información bayesiano

Cuadro 4. Coeficientes de los efectos fijos

	Valor	Error estándar	DF	t-value	p-value
Intercepto	3,28972	0,03176	263	103,59226	<0,0001
T ⁻¹	-3,41453	0,12857	263	-26,55751	<0,0001

Para analizar las mediciones repetidas de PPM se realizó el ajuste del modelo de Schumacher bajo la óptica de los modelos lineales mixtos. Como los datos provienen de PPM en donde existe correlación residual entre las observaciones que corresponden a una misma parcela, es necesario considerar la estructura de la matriz de covarianza residual, la cual es posible modelar por medio de la matriz de correlación (Di Rienzo *et al.* 2011).

El análisis de datos comprendió el ajuste de diferentes modelos, incluyendo efectos aleatorios con diferentes estructuras de covarianza, estructuras de correlación residual y modelación de la heterocedasticidad residual, en el caso de que hubiera. Se eligió el mejor modelo tomando en cuenta los criterios de verosimilitud AIC (criterio de información de Akaike) y BIC (criterio de información bayesiano). Con el mejor modelo seleccionado se estimó el índice de sitio para cada parcela, el cual permitió definir desde los mejores sitios hasta los más pobres.

De todos los modelos probados, se seleccionaron los dos modelos con los mejores ajustes. Estos modelos se desarrollaron para la variable respuesta Hd, transformada a logaritmo. En el Cuadro 2 se detallan los dos modelos seleccionados. La prueba de cociente de verosimilitudes mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los dos modelos (Cuadro 3); al comparar los valores de AIC y BIC para las estructuras que se ajustaron, se encontró que el menor valor se obtiene con el modelo 2.

Después de ajustar el modelo 2, se procedió a escribir el modelo final de índice de sitio, utilizando los paráme-

tros fijos del modelo mixto (Cuadro 4). en función de la altura dominante y de la edad de los árboles.

$$\ln(Hd) = 3,28972 + (-3,41453 * (T^{-1}))$$

El índice de sitio (S) se estima para cada parcela por medio del modelo ajustado. Para esta estimación se utilizó la última medición de la parcela. Considerando una edad de referencia de diez años, se puede calcular el índice de sitio mediante la ecuación:

$$\ln(S) = \ln(Hd) + 3,41453 * ((T + 1)^{-1} - 10^{-1})$$

Con el fin de comparar las PPM analizadas, se definieron cuatro clases de índice de sitio: bajo (<16 m), medio (16-20 m), alto (20-24 m) y excelente (>24 m). Se encontró que las parcelas con crecimientos medios y altos corresponden al 60% del total, lo que refleja condiciones adecuadas de crecimiento (Figura 3, Cuadro 5).

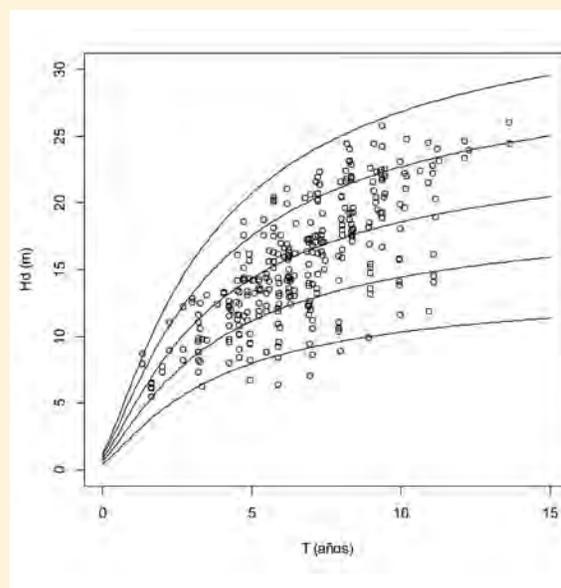


Figura 3. Curvas de índice de sitio estimadas para plantaciones de teca en diversas regiones de Guatemala.

Cuadro 5. Frecuencia de PPM por clase de sitio en plantaciones de teca

Clase de sitio	Índice de sitio (m)	Total de PPM	% de PPM
Bajo	<16	21	29,16
Medio	16 a 20	25	34,73
Alto	20 a 24	18	25,00
Excelente	> a 24	8	11,11
	Total	72	100

Resultado de InfoStat del modelo seleccionado

Modelos lineales generales y mixtos

Especificación del modelo en R

```
modelo.004_LN_Hd_1m_REML<-lme(LN_Hd_1m~1+I(T^(-1))  
,random=list(PLOT=pdIdent(~1))  
,weights=varComb(varPower(form=~fitted(.)))  
,method="REML"  
,control=lmeControl(msMaxIter=200)  
,na.action=na.omit  
,data=R.data00  
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: modelo.004_LN_Hd_1m_REML

Variable dependiente: LN_Hd_1m

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
336	-340,94069	-321,88498	175,47034	0,86936	0,48673	0,83183

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	263	12588,22585	<0,0001
I(T^(-1))	1	263	705,30152	<0,0001

Efectos fijos

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	3,28972	0,03176	263	103,59226	<0,0001
I(T^(-1))	-3,41453	0,12857	263	-26,55751	<0,0001

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Fórmula: ~1|PLOT

Desvíos estándares relativos al residual y correlaciones

(const)	
(const)	0,23222

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varPower

Fórmula: ~ fitted(.)

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
power	-2,18039

Literatura citada

- Clutter, J.L.; Fortson, J.C.; Pienaar, L.V.; Brister, G.H.; Bailey, R.L. 1983. Timber management: A quantitative approach. Wiley & Sons.
- Cojom, J. 2008. Informe de crecimiento y productividad inicial de plantaciones forestales beneficiarias del programa de incentivos forestales (Pinfor). Guatemala, Instituto Nacional de Bosques. 127 p.
- Di Rienzo, J.; Macchiavelli, R.; Casanoves, F. 2011. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat. Córdoba, Argentina, Grupo InfoStat.
- Marmillod, D. 2012. La red de parcelas permanentes de medición forestal en plantaciones, bosque natural latifoliado y de coníferas en Guatemala. Diagnóstico del estado actual. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 49 p. (Serie Técnica. Boletín Técnico no. 58).
- Mora, F.; Meza, V. s.f. Comparación del crecimiento en altura de la teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y en otras regiones del mundo (en línea). Snt. Disponible en: http://www.yoque.com.ar/resources/external/material_probabilidad_y_estadistica/ComparaCrecTeca3.pdf
- Schumacher, F. 1939. A new growth curve and its application to timber yield studies. Journal of Forestry 37:819-820.
- Vanclay, J. 1994. Modelling forest growth and yield: Applications to mixed tropical forests. London, UK, CAB International. 312 p.