

Actualización

CALIDAD DE SITIO Y FACTORES AMBIENTALES EN BOSQUES DE CENTRO AMERICA¹

Bernal Herrera²/*, Alfredo Alvarado**

RESUMEN

El presente trabajo compila la información publicada sobre los estudios que determinan la calidad de sitio a partir de factores ambientales en bosques de edad conocida (plantaciones, bosques secundarios y rodales de pinos) en Centro América. Los estudios incluyen las siguientes especies: *Bombacopsis quinatum*, *Cordia alliodora*, *Cupressus lusitanica*, *Gliricidia sepium*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. deglupta*, *E. grandis*, *Leucaena leucocephala*, *Pinus caribaea*, *P. oocarpa*, *Tectona grandis*, y *Vochysia ferruginea*. Se analizan los elementos metodológicos utilizados en los diferentes estudios y se analizan aquellos factores ambientales que determinaron la productividad de cada una de las especies mencionadas.

ABSTRACT

Site quality and environmental factors in Central American forests. Published information, related with the estimation of the productive capacity of site based on environmental factors in forests of known age in Central America, was compiled; it included plantations, natural regenerate pines forests, and secondary forests. The following species were considered: *Bombacopsis quinatum*, *Cordia alliodora*, *Cupressus lusitanica*, *Gliricidia sepium*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. deglupta*, *E. grandis*, *Leucaena leucocephala*, *Pinus caribaea*, *P. oocarpa*, *Tectona grandis*, and *Vochysia ferruginea*. The methods used to estimate age, the size and the number of sample plots, the site quality indicators, the criteria used in the selection of each study site and the soil sample depth were compared. The climatic, topographic and soil factors that affect the productive capacity of the species considered were also analyzed.

INTRODUCCION

En las ciencias forestales, el término "calidad de sitio" se utiliza para denotar la productividad relativa de un sitio para una especie forestal (FAO 1985), lo cual permite realizar clasificaciones de la

calidad del terreno según su potencial de producción (Vincent 1980, Clutter et al. 1983).

Los estudios para la predicción de la productividad de un determinado sitio a partir de factores ambientales, usualmente representada por el índice de sitio (la altura dominante que alcanzan los individuos a una determinada edad, denominada edad base o edad índice (Alder 1980)) han sido utilizados en los Estados Unidos y Europa desde los años 30 (Haig 1929, Coile 1935, Kilian 1981).

Hasta 1975 existían en los EEUU por lo menos 150 estudios de clasificación de sitios a partir de factores ambientales (Carmean 1975).

1/ Recibido para publicación el 6 octubre de 1997.

2/ Autor para correspondencia.

* Proyecto Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Código Postal 2060, San José, Costa Rica.

Mientras tanto en Centroamérica los estudios se iniciaron en la década de los 50 (Goitia 1954) y hasta la fecha alcanzan un número de 18, concentrados en 13 especies forestales y con un solo estudio en bosques naturales latifoliados discetáneos (Gutiérrez y Mize 1993).

La clasificación de los sitios es vital dentro del manejo forestal, ya que permite la estimación del rendimiento de las masas forestales, la planificación de trabajos de investigación (e.g. ensayos de regímenes de raleos), la programación de trabajos de mantenimiento (limpias, raleos, podas, etc.) y la extrapolación o extensión de la clasificación de calidad de sitio a áreas aún sin plantar (Vincent 1980). Estos estudios tienden a mejorar la escogencia de tierras para fines forestales, ya que no se basan en los criterios eminentemente agrícolas empleados con anterioridad (Klingebiel y Montgomery 1961, Plath 1967, Sheng 1971).

Solamente en Costa Rica, entre 1979 y 1995 se plantaron a través del sistema de incentivos fiscales un total de 13.9000 ha (Canet et al. 1996), lo que representó una inversión de unos 11.000 millones de colones. Para el año 1992 se habían rescindido 33 proyectos de reforestación incentivados, para un total de 5.975 ha (12% del total reforestado con incentivos hasta 1990), siendo la pérdida estatal de 261 millones de colones (Segura 1992). Entre 1990 y 1995 se plantaron anualmente 16.000 ha, con una tendencia ascendente (Canet et al. 1996), por lo que los estudios que contribuyan a la selección de los sitios para plantar, serán cada vez más necesarios para la elaboración de planes de desarrollo del sector forestal nacional.

La información sobre la estimación de la calidad de sitio a partir de factores ambientales en Centro América ha presentado una importante variación en la metodología empleada. Además, esta misma información, y la concierne a los factores ambientales que afectan la calidad de sitio, se encuentran dispersas y, en algunos casos, son de difícil acceso. Es así como el presente artículo analiza tanto las metodologías empleadas, así como las relaciones entre el potencial productivo del sitio y aquellos factores ambientales que en mayor grado afec-

tan las especies en bosques donde es posible conocer la edad (plantaciones forestales, bosques secundarios y bosques de coníferas) en Centroamérica.

ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS

En el Cuadro 1 se resumen, por especie y según el sitio de estudio, los aspectos relacionados con la metodología empleada en los estudios consultados. Se detallan la edad de evaluación, la variable dasométrica utilizada como indicadora del potencial productivo del sitio, el tamaño y el número de parcelas empleados.

Edad de evaluación

Como lo muestra el Cuadro 1, los estudios sitio-suelo de Centroamérica se han concentrado principalmente en plantaciones forestales con edades entre los 0.3 y los 40 años. No obstante, la gran mayoría se han desarrollado en plantaciones jóvenes.

La edad de las plantaciones de *Gmelina arborea* y *Cordia alliodora* consideradas oscila entre los 2 y los 3 años, lo cual puede influir en la aplicabilidad de los resultados. La altura dominante se utiliza como indicador de la capacidad productiva de un sitio porque los árboles dominantes representan el mayor crecimiento posible dadas las condiciones ambientales particulares en el sitio de evaluación. Por lo tanto, en árboles muy jóvenes es posible que la altura dominante o el incremento en altura no representen el verdadero potencial del sitio, sino que se esté expresando el efecto de otros factores tales como la variabilidad genética, técnicas de reproducción y manejo en el vivero, entre otros. Por lo tanto, los modelos para la predicción del potencial productivo del sitio, donde se utilizaron plantaciones menores a 5-6 años, deben considerarse como preliminares y su empleo debe considerarse esta limitante.

Se ha realizado una sola investigación en un bosque secundario coetáneo de 28 años de edad en Costa Rica (Herrera 1996), mientras que en rodales de *Pinus oocarpa* se han realizado 2

Cuadro 1. Aspectos metodológicos utilizados en los estudios sitio-suelo en Centroamérica.

Especie	Sitio de estudio	Edad de evaluación (años)	Variable indicadora productividad	Tamaño parcela (m ²)	Número de parcelas	Fuente
<i>Cupressus lusitanica</i>	Valles Central y del General, Costa Rica	7-33	La altura que alcanzan los árboles dominantes a un diámetro de 48 cm	Variable	29	Goitia (1954)
<i>Pinus caribaea</i>	Turrialba, Costa Rica	2-6	IS Hdom=promedio de la altura de los árboles dominantes y codominantes	n.r.	11	Isolán (1972)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	Turrialba, Costa Rica	0,5-8	IS Hdom=promedio de la altura de los árboles dominantes y codominantes/parcela	100	n.r.	Jadán (1972)
<i>Cupressus lusitanica</i>	Valle Central, Costa Rica	5-15	IS (estimado en otro estudio) Hdom=el 10% de los árboles más altos/parcela	1000	24	Alfaro (1983)
<i>Pinus caribaea</i>	Turrialba, Costa Rica	1-8	IS Hmayor=los 5 árboles más altos/parcela	324	30	Ortega (1986)
<i>Bombacopsis quinatum</i>	15 sitios en Costa Rica	3-40	IS Hmayor=altura de promedio de los 100 árboles más altos/ha	49	15	Navarro (1987)
<i>Pinus caribaea</i>	La Yeguada, Panamá	7-17	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	50 y 100	38	Vásquez (1987)
<i>E.camaldulensis</i>	Centroamérica	0.4-11.8	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	n.r.	64	Campos (1989)
<i>Leucaena leucocephala</i>		0.5-4.9		n.r.	38	
<i>Gliricidia sepium</i>		0.3-5.7		n.r.	178	
<i>Gmelina arborea</i>	Pacífico Sur, Costa Rica	1.3-15.5	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	400 (temporales, circulares)	43	Obando (1989)
<i>Gmelina arborea</i>	Zona Sur, Costa Rica	2	Incremento en Hdom Hdom=6 árboles más gruesos por parcela	400	n.r.	Zeazer y Murillo (1992)
<i>G. arborea</i>	Zona Norte, Costa Rica	3	Incremento en altura (cm/mes)	400 (20x20 m)	24	Stuhmann <i>et al.</i> (1994)

Continúa...

Continuación Cuadro 1

Especie	Sitio de estudio	Edad de evaluación (años)	Variable indicadora productividad	Tamaño parcela (m ²)	Número de parcelas	Fuente
<i>G. arborea</i>	Sarapiquí, Costa Rica	2.6	H dom=n.r.	49 árboles	21	Murillo y Camacho (1992)
<i>Cordia alliodora</i>	Tierras bajas de la Zona Norte, Costa Rica	2.5	Incremento en altura (cm/mes)	225 (15m*15m)	22	Bergmann et al. (1994)
<i>B. quinatum</i>	Guanacaste	1.5-15.5	IS	49 árboles	30	Vásquez y
<i>G. arborea</i>	Costa Rica	0.75-15.5	Hdom=promedio de los 100		26	Ugalde
<i>Pinus caribaea</i>		2.3-19.5	árboles más gruesos/ha		16	(1994)
<i>Tectona grandis</i>		4.5-14.7			21	
<i>Eucalyptus deglupta</i>	Turrialba Costa Rica	2-4	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	25 y 12 árboles	37	Sánchez (1994)
<i>E. grandis</i>	Turrialba, Costa Rica	2.4	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	25 y 12 árboles	57	Sánchez (1994)
<i>Pinus oocarpa</i> (bosque natural)	Zona Central Honduras	> 15	IS Hdom=promedio de los 2 árboles dominantes y codominantes/parcela	400	195	Valdés et al. (1995)
<i>E. deglupta</i>	Región Huetar Norte, Costa Rica	4-16	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	256, 576, 1024	50	Chavarría (1996)
<i>Vochysia ferruginea</i> (bosque secundario)	San Carlos, Costa Rica	28	Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha bien iluminados	400	24	Herrera (1996)
<i>P. oocarpa</i> (bosque natural)	Sierra de las Minas, Guatemala	n.r.	IS Hdom=promedio de los 100 árboles más altos/ha	500 (circular)	38	Revolorio (1996)
<i>B. quinatum</i>	Guanacaste,	3.6-13.2	IS		42	Vallejos
<i>G. arborea</i>	Costa Rica	4.1-15.5	Hdom=promedio de los 100	49	33	(1996)
<i>T. grandis</i>		3.1-14.8	árboles más altos/ha	árboles	64	

IS=Índice de sitio / Hdom=Altura dominante / Hmayor=Altura mayor / n.r.=no reportado por el autor.

estudios, el primero en Honduras (Valdés et al. 1994) y el segundo en Guatemala (Revolorio 1996). Los bosques secundarios tropicales se tratan como coetáneos debido a su dinámica poblacional (Finegan 1996), mientras que la edad de los bosques naturales de coníferas se determinó por medio del análisis fustal.

Variable indicadora de la productividad del sitio

En Centroamérica el índice de sitio (IS) ha sido la variable más utilizada para estimar el potencial productivo de un determinado sitio. La estimación del IS parte de la relación altura-edad, siendo el concepto de altura dominante, definido como "el promedio de los 100 árboles más altos/ha", el más aplicado en este tipo de estimaciones (Cuadro 1).

Isolán (1972), Jadán (1972) y Valdés et al. (1994) aplicaron variantes a este concepto (Cuadro 1), utilizando como definición de altura dominante el promedio de los 100 árboles dominantes y codominantes más altos/ha. El emplear esta definición de altura tiene el inconveniente de que puede ser más afectada por la densidad, pues los árboles codominantes son más afectados por la competencia que los árboles más altos (Vincent 1980, Ortega y Montero 1988).

En la Zona Sur de Costa Rica, Zeazer y Murillo (1992) utilizaron el promedio de los 6 árboles más gruesos en parcelas de 400 m², utilizando el incremento en altura dominante como la característica que define el potencial productivo del sitio. Por su parte Bergmann et al. (1994) y Stuhmann et al. (1994) utilizaron como variable indicadora de la productividad el incremento en altura total de *G. arborea* y *C. alliodora*, respectivamente. Goitia (1954) utilizó la altura que alcanzan los árboles dominantes a 48 cm de diámetro. En el caso de Obando (1989), utilizó el índice de sitio como variable indicadora de productividad, no obstante este proviene de parcelas temporales, por lo que la precisión de las estimaciones es poco confiable (Alder 1980). Herrera (1996) definió la altura dominante de *Vochysia ferruginea* como el promedio de los 100 árboles más altos bien iluminados por parcela; se optó por esta definición ya

que en bosques naturales existen individuos más altos que los árboles de la especie de interés, es decir, que si no se toma en cuenta su grado de iluminación no serían estrictamente dominantes.

Selección de los sitios de estudio

Los criterios para la selección de los sitios de estudio han variado en las diferentes investigaciones realizadas. Por ejemplo Jadán (1972) señala que la selección de los sitios se supeditó a los datos disponibles en ese momento, mientras que Alfaro (1983) seleccionó los sitios de su trabajo al azar, debido a que en la zona de estudio existían un buen número de plantaciones de *Cupressus lusitanica* (Cuadro 1).

En los estudios más recientes llevados a cabo en Costa Rica, se ha realizado en primera instancia una caracterización ambiental detallada de la zona de estudio, para así estratificar según la variación de las condiciones ambientales. Zech (1994) desarrolló una estratificación de acuerdo con los "macrositios" (partes de la región con características fisiográficas uniformes) y de los "micrositios" (unidades con condiciones de suelo y relieve similares). Esta metodología le permitió tener observaciones en una amplia gama de condiciones ambientales. Bergmann et al. (1994) y Stuhmann et al. (1994) realizaron una estratificación según el crecimiento (alto o pobre) de las plantaciones y luego generaron el estudio según los estratos de suelo encontrados. Obando (1989) realizó y ajustó modelos para la predicción del IS a partir de factores edáficos, aplicando una estratificación según las condiciones de humedad de los sitios. Herrera (1996) realizó, previo a la toma de datos, una estratificación del área de estudio según el tipo de suelo presente.

En el estudio de Valdés et al. (1994), que cubrió una extensión de 21.224 ha, realizaron una estratificación jerárquica, partiendo de áreas considerables de terreno con características similares (Áreas de Crecimiento) hasta llegar a áreas menores con características similares (Tipos de Sitio). Para la definición de estos estratos consideraron aspectos como la vegetación, el clima, la zona de vida, la geología, la forma del terreno,

series de suelo, entre otros. Además, esta estratificación considera factores ambientales y su efecto en el crecimiento de *P. oocarpa*.

Los resultados obtenidos hasta el presente con estratificaciones según alguna característica ambiental, indican que este procedimiento podría favorecer la interpretación de los modelos de predicción y permitirá emitir, con mayor certeza, criterios de corrección por factores limitantes para cada uno de los diferentes estratos.

Tamaño y número de parcelas

Dependiendo del estudio, el tamaño de las parcelas de medición ha variado desde 100 m² (Isolán 1972) hasta 1000 m² (Alfaro 1983), siendo el ámbito entre 200 y 500 m² los tamaños más utilizados (Cuadro 1).

En este tipo de estudios se intenta disminuir la variación en la productividad dentro de las parcelas y maximizar la variación entre ellas (Carmean 1975). El uso de parcelas muy grandes y en sitios muy heterogéneos dificulta este propósito. Una de las formas de comparar la variación dentro de parcelas es a través del coeficiente de variación (CV). Como criterio general, un CV en la altura dominante o el IS superior al 25% puede indicar una alta heterogeneidad dentro de la parcela (Herrera 1996), es decir, que dentro de la misma se pueden encontrar áreas con diferente potencial productivo, estado fitosanitario, manejo, etc. (Carmean 1975). Esta inconsistencia generará errores importantes en la precisión de los modelos de regresión y en la magnitud de la variación explicada (Vanclay 1994).

En síntesis, no hay un tamaño de parcela ideal para este tipo de estudios; por el contrario, el tamaño de parcela adecuado deberá ser el punto donde se presente el menor número de árboles a medir y la menor variación en la productividad dentro de la parcela. También, debe tomarse en cuenta la extensión de unidades fisiográficas homogéneas, ya que la parcela podrá ser más grande mientras más uniforme sea el área donde se tomará la muestra.

Para fijar el tamaño de parcela, así como el número mínimo de observaciones necesarias, se requieren investigaciones específicas, preferible-

mente a nivel regional, que abarquen las prácticas de manejo y las condiciones ambientales en que se desarrollan las plantaciones de diferentes especies.

En los estudios citados el número de parcelas ha oscilado entre 11 y 64 (Cuadro 1). Vásquez y Ugalde (1994) señalan que aún 37 observaciones no son suficientes para explicar la variación en el índice de sitio de *Tectona grandis*. En la decisión del número mínimo de parcelas a emplear en este tipo de estudios, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- Magnitud de la variación ambiental de la zona de estudio. Conforme aumente el área de estudio será necesario elevar el número de observaciones, al incrementar la variación ambiental.
- Escala de estudio. Un estudio regional exigirá un mayor número de observaciones que un estudio a nivel de finca.
- Disponibilidad de recursos, tanto humanos como financieros.

Por último, es importante resaltar el hecho de que los modelos para la predicción del índice de sitio pueden ser construídos a partir de datos provenientes de parcelas permanentes de medición o de parcelas temporales. De lo anterior también dependerá la selección de los métodos matemáticos de ajuste de las curvas de índice de sitio. Las curvas desarrolladas a partir de datos provenientes de parcelas temporales son poco precisas en la mayoría de los casos, por lo que datos periódicos altura-edad provenientes de parcelas permanentes o análisis fustales son sin duda los que producen curvas de índices de sitio más precisas (Alder 1980). En el caso de la presente revisión, en la mayoría de los estudios consultados se utilizaron datos de parcelas permanentes de medición o análisis fustal para estimar el índice de sitio, salvo en el caso del estudio de Obando (1989), quien utilizó datos provenientes de parcelas temporales.

Profundidad utilizada en el muestreo de suelos

En general, en los estudios de calidad de sitio se han utilizado 2 métodos de muestreo de

Cuadro 2. Métodos para el muestreo de suelos en los estudios de calidad de sitio en Centro América.

Autor (s)	Especie	Profundidad (cm)
Profundidad fija		
Alfaro (1983)	<i>Cupressus lusitanica</i>	0-25, 25-50
Isolan (1972)	<i>Eucalyptus deglupta</i>	0-30
Chavarría (1996)	<i>Eucalyptus deglupta</i>	0-30
Sánchez (1996)	<i>Eucalyptus deglupta</i>	0-50
Campos (1989)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	
	<i>Gliricidia sepium</i>	
	<i>Leucaena leucocephala</i>	0-15, 15-40
Ortega (1986)	<i>Pinus caribaea</i>	0-20, 20-50
Vásquez (1987)	<i>Pinus caribaea</i>	0-15, 15-30, 30-50
Revolorio (1996)	<i>Pinus oocarpa</i>	0-15, 15-30
Obando (1989)	<i>Gmelina arborea</i>	0-25
Murillo y Obando (1992)	<i>Gmelina arborea</i>	0-20
Zeazer y Murillo (1992)	<i>Gmelina arborea</i>	0-15
Vásquez y Ugalde (1994)	<i>Bombacopsis quinatum</i>	0-20
	<i>Gmelina arborea</i>	
	<i>Pinus caribaea</i>	
	<i>Tectona grandis</i>	
Vallejos (1996)	<i>Bombacopsis quinata</i>	0-20
	<i>Gmelina arborea</i>	
	<i>Tectona grandis</i>	
Herrera (1996)	<i>Vochysia ferruginea</i>	0-12, 12-30
Profundidad por horizonte		
Bergmann et al. (1994)	<i>Gmelina arborea</i>	A, B
Navarro (1987)	<i>Bombacopsis quinata</i>	A, B
Stuhrmann et al. (1994)	<i>Cordia alliodora</i>	A, B

suelos. En el primero de ellos se toma la muestra de suelo a una profundidad predeterminada (e.g. 0-20 cm), mientras que en el otro se fija la profundidad según el desarrollo de los horizontes del suelo. En los estudios realizados en Centroamérica se ha utilizado principalmente el muestreo a una profundidad predeterminada (Cuadro 2). Este método se ha basado principalmente en la distribución de las raíces absorbentes en el suelo, es decir, se considera como una buena profundidad de muestreo aquella en la cual se concentre el mayor volumen de raíces activas en la absorción de nutrientes y agua.

En los casos donde no se presente un horizonte A, o en sitios con un número y grosor de horizontes del suelo muy heterogéneos, utilizar una profundidad de muestreo predeterminada

puede ser más recomendable para facilitar el análisis y la interpretación de los datos. Además, debe considerarse que es mucho más fácil y económico emplear profundidades de muestreo predeterminadas pues se obtendrán modelos matemáticos para la predicción de la calidad de sitio mucho más prácticos. Mientras no se cuente con datos más precisos sobre la distribución de raíces de aquellas especies forestales de interés, es difícil hacer una recomendación sobre la mejor profundidad de muestreo de suelos para este tipo de estudios.

FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD SEGÚN LA ESPECIE

Los diferentes estudios citados se han llevado a cabo en suelos tan disímiles como Entiso-

Cuadro 3. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes ¹			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Turrialba, Costa Rica	n.r.	--	Pendiente (-)	Nivel de la capa freática (-) Profundidad efectiva (-) Drenaje (-)	No se construyó	Isolan (1972)
Turrialba, Costa Rica	Inceptisol Ultisol	--	Altitud (-) Pendiente (-) Microrrelieve (micro) (+)	Densidad de partículas (-) Profundidad efectiva (PF) Cu (0-50 cm) Na (0-20 cm)	IS*=1.02 +0.14% limo +0.018 altitud +1.94 PF +0.037 micro R ² =50%	Ortega (1986)
La Yeguada, Panamá	Inceptisol Entisol Ultisol	--	Posición topográfica (-) Elevación (-)	Drenaje interno (-) pH (+), Zn (-) Mn (-) %limo (-) Cu (+)	IS=279.53 +5.9 drenaje +82.01 pH +0.59 Mn -4,3 Zn +7.84 Cu R ² =94%	Vásquez (1987)
Guanacaste, Costa Rica	Inceptisol Alfisol Andisol	Precipitación media anual (+) Temperatura media anual (TMA) (-) Viento (-)	--	Profundidad del suelo (-)	IS=44.75 -1.124 TMA R ² =25%	Vásquez y Ugalde (1994)

1 El número en paréntesis indica que el tipo de correlación (negativa o positiva) que presentó el factor con la productividad de la especie.

* El autor presenta 7 modelos diferentes para estimar el índice de sitio. Se reporta aquí el que se consideró que presentaba un menor número de variables, simples de medir, y un R² satisfactorio.

les, Inceptisoles, Andisoles, Molisoles, Vertisoles, Alfisoles y Ultisoles (Cuadros 3-8). Si bien la correlación entre los órdenes de suelos y la productividad de las especies no se ha probado, algunas variables edáficas como la profundidad efectiva del suelo (reducida en la mayoría de los Entisoles), sí ha correlacionado con las variables que afectan el crecimiento. Este aspecto merece mayor investigación en el futuro.

Debido a que los factores climáticos presentan variaciones a escalas suficientemente grandes, un índice basado sólo en factores climáticos no es lo necesariamente preciso como para determinar la calidad de los sitios en áreas relativamente peque-

ñas (Myssonen 1971, citado por Donoso 1981). En ninguno de los estudios citados se han utilizado únicamente variables climáticas para la predicción de la productividad, aun en el caso del estudio de Campos (1989), el cual es de carácter regional. Más bien, en varios de los estudios donde se emplean factores del clima se incluyen frecuentemente elementos del relieve y del suelo en los modelos estadísticos como variable que predice, en parte, la calidad de sitio (e.g. Navarro 1987, Vásquez y Ugalde 1994, Campos 1989).

A continuación se resumen los factores ambientales que han sido señalados como importantes para cada una de las especies estudiadas en

Centro América, según los documentos que se sintetizan en el presente trabajo.

Pinus caribaea (Cuadro 3)

En Costa Rica el crecimiento de *P. caribaea* se ha visto afectado en forma negativa por temperaturas medias anuales bajas (entre 22.6 y 28.0°C) (entre paréntesis se representan los valores máximo y mínimo de la variable analizada, según el correspondiente estudio). Este hecho se asocia con variaciones en la altitud sobre el nivel del mar (Vásquez y Ugalde 1994). Los resultados obtenidos en Panamá (Vásquez 1987) indican que la productividad de esta especie disminuye conforme aumenta la altitud sobre el nivel del mar (entre 510 y 1060 msnm) (Cuadro 3).

En la región de Turrialba, Costa Rica, la profundidad efectiva del suelo (entre 11 y 120 cm) es un factor limitante para el crecimiento de la especie, bien sea por mal drenaje, capas altas del nivel freático o por la alta densidad de partículas (Cuadro 3). En Guanacaste, Costa Rica, de

nuevo la profundidad del suelo fue el único factor edáfico que se presentó como limitante (los mejores sitios presentaron profundidades superiores a los 80 cm). Los 3 estudios resaltan un mejor desarrollo de *P. caribaea* en suelos profundos y de fertilidad baja a moderada (Cuadro 3).

Desde el punto de vista nutricional, el crecimiento de *P. caribaea* se ve afectado positivamente por niveles adecuados de Cu (Ortega 1986, Vásquez 1987), valores de pH neutros (Vásquez 1987) y pendientes empinadas (Isolán 1972, Ortega 1986, Vásquez 1987).

P. oocarpa (Cuadro 4)

En el caso de *Pinus oocarpa*, en bosques de Guatemala esta especie también presentó limitantes para su crecimiento en suelos poco profundos (entre 15 y 110 cm) y bajos en concentraciones de Ca (entre 0.94 y 6.8 cm(+)/kg) y K (entre 15 y 148 mg/kg). Mayores concentraciones de P disponible afectan positivamente el crecimiento de *P. oocarpa* (Revolorio 1996).

Cuadro 4. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Pinus oocarpa* Sch.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Zona Central, Honduras	n.r.	Precipitación media anual (+) Temperatura media anual (+)	Forma terreno Grado de disectación de la pendiente Aspecto (-) Pendiente (-)	Rocosisdad (-) Profundidad del suelo (+)	$IS^* = b_1 U + b_2 T + b_3 R + b_4 S + b_5 P + b_6 C + b_7 SA + b_8 PCN + b_9 PCN^2 + b_{10} PR + b_{11} TE + b_{12} TE^2$ $R_2=64\%$	Valdés <i>et al.</i> (1994)
Sierra Minas, Guatemala	n.r.	-	Pendiente (-) Posición en la pendiente (-) Forma terreno (-)	Erosión (-) Pedregosidad (-) Profundidad (Pf) (-) P, K, Ca (+)	$IS=11.17 + 0.08 Pf + 0.014 K + 0.814 Ca$ $R^2=64\%$	Revolorio (1996)

* U=Código de unidad de sitio; T=Código de tipo de sitio; R=Código de superficie rocosa; S=Código de zona de vegetación; P=%pendiente; C=%P * cos aspecto; SA=%P * sen aspecto; PCN=precipitación media anual; PR=profundidad del suelo; TE=temperatura media anual.

Cuadro 5. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Eucalyptus deglupta*, *E. camaldulensis* y *E. grandis*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Turrialba, Costa Rica	n.r.	-	Drenaje (+)	Profundidad efectiva (-) Profundidad capa freática (-) %Arena (-) %Arcilla (+) Materia org (-) Mg, pH, K (+)	No se construyó	Jadán (1972)
Turrialba, Costa Rica	n.r.	-	-	Mg (+), K (+) P (+), Mn (+) %Arcilla (-)	IS(m) = 14.65 + 1.92 Mg + 0.21 Mn - 0.092 % arcilla R ² =56%	Sánchez (1994)
Región Huetar Norte, Costa Rica	n.r.	-	-	% Arcilla (-) Ca (+) Mg (+) Zn (+)	IS(m) = 25.32 + 3.24 Mg - 0.22 % arcilla R ² = 40%	Chavarría (1996)
Centro América	Inceptisol Entisol Alfisol Ultisol Molisol Vertisol	Zona de vida Precipitación	Altitud (-) Pendiente (-) Erosión (-) Drenaje (-) Uso anterior (-) Cultivos intercalados (-) Preparación suelo (+)	%Arcilla (-) %Mat org. (-) Retención de agua (+) Sumatoria bases (+) Ca/Mg(+) K, Al, Zn (+) P, Mn, Cu (+)	IS = 14.0 - 0.00317 altitud - 1.29 erosión - 0.000919 precipitación - 0.552%Mat. org. 15.40 + 0.426 Ca/Mg ext ₁₅₋₄₀ R ² =63%	Campos (1989)
Turrialba, Costa Rica	n.r.	-	Altitud (-)	Ca, Mg %Arena (-) Densidad aparente	IS=-27.99 +42.54 Mg R ² =21%	Sánchez (1994)

En Honduras esta especie es afectada por la precipitación y la temperatura. Además, la productividad se ve afectada en forma negativa por el aspecto de la pendiente, el grado de pendiente, el grado de rocosidad en el suelo y la profundidad del mismo.

Otros factores que afectan negativamente el crecimiento de esta especie son niveles de pedregosidad altos (entre 1 y 85% del área evaluada) (Revolorio 1996).

Eucalyptus deglupta, *E. camaldulensis* y *E. grandis* (Cuadro 5)

Campos (1989) demuestra que, a nivel Centroamericano, aumentos en la elevación (entre 16 y 120 msnm) tienden a perjudicar el crecimiento de *Eucalyptus camaldulensis* (Cuadro 5).

Para la especie *E. deglupta* se han realizado hasta la fecha 3 estudios que relacionan la

calidad de sitio con propiedades del suelo (Jadán 1972, Sánchez 1994, Chavarría 1996). Tales estudios indican la necesidad de esta especie para su buen crecimiento, de suelos profundos (mayores a 60 cm), con buen drenaje, no arcillosos y de fertilidad alta (Cuadro 5). Los modelos de productividad de las especies incluyen una correlación positiva con los contenidos de Mg (entre 0.3 y 4.2

cmol(+)/L) y Ca (entre 0.5 y 14.7 cmol(+)/L). Otros elementos que pueden limitar el crecimiento de las especies cuando se encuentran deficientes son K, P, Mn, Cu y Zn. En general, altos contenidos de materia orgánica (> 5%) y de arcilla (> 35%) desfavorecen su desarrollo, probablemente porque se asocia con condiciones de mal drenaje (Sánchez 1994).

Cuadro 6. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Gmelina arborea*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/topográficos	Edáficos		
Sarapiquí, Costa Rica	n.r.	-	-	% Sat Al (-) % Saturación bases (+)	No se construyó	Calvo y Camacho (1992)
Zona Norte, Costa Rica	Nitisol Rojizos (>Al)	-	-	K (30 cm), N (+) % Sat Al (-) P (+) K/Mg (30 cm) (+) Grosor horizonte A (GA) (+) D aparente (da) (-) Años de uso anterior (-)	Inc* = 80 + 0.6 GA + 40 K/Mg _{30 cm} - 60 da R ² = 91%	Stuhrmann et al. (1994)
	Cambisol Café	-	-	[P total] (+) % Sat Al (-) pH K/Mg (30 cm) (+) D aparente (da) (-) Años de uso anterior (-)	Inc = 116 - 53 da - 0.7 % Sat. Al R ² = 82%	
Zona Norte, Costa Rica	n.r.	-	Pendiente (-) Distancia de la cima (+) Forma del terreno (+)	Compactación (-) Grosor horizonte A (GA) (-) Densidad aparente (da) (-)	Inc = 41 - 31 da + 2.5 uso anterior + 0.3 GA + 3 dist de la cima R ² = 86%	Zech (1994)
Zona Sur, (llanuras del sur de la Región Brunca) Costa Rica	Inceptisol	n.r.	n.r.	n.r.	IMA hdom ** = 34.10 - 5.07 pH - 0.024 Fe + 0.0749 CICE + 0.352 Ca/Mg R ² = 81 % IMA hdom ** = 8.0605 - 0.0774 % Saturación Al - 0.0642 Mg/K R ² = 91%	Zeazer y Murillo (1992)

* Inc = Incremento en altura (cm/mes)
** ecuación para Eutropets

Continuación Cuadro 6

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Tierras bajas del Pacífico Sur (< 1000 msnm), Costa Rica	n.r.	Se estratificó según las condiciones de humedad	Microrelieve	Pedregosidad (Ped) Compactación (Comp) K pH Acidez Suma de bases	IS= 29.5 + 1.96 Comp + 20.2 Ped + 65.62 K _{25 cm} - 7.80 Acidez extraíble R ² = 98.4%	Obando (1989)
Guanacaste, Costa Rica	Alfisol Inceptisol Entisol	Viento (-)	Elevación (-) Posición topográfica (PT) (+)	Ca primer horizonte (+) Mg primer horizonte (+)	IS = 17.311 + 2.637 PT - 2.754 viento 0.221 Ca R ² = 56% IS = 20.006 + 3.033 PT - 3.147 viento R ² = 48%	Vásquez y Ugalde (1994)
Guanacaste, Costa Rica	n.r.	Viento (-)	Posición topográfica (PT) (+)	Ca primer horizonte (+)	IS = 15.51 + 2.08 PT - 2.33 viento + 0.188 Ca R ² = 58 %	Vallejos (1996)

Gmelina arborea (Cuadro 6)

La especie *Gmelina arborea* es una especie considerada basófila, por lo que su crecimiento se favorece conforme aumentan los contenidos, en los primeros 20 cm de suelo, de Ca (entre 6.0 y 22.3 cmol(+)/L), Mg (de 1.6 hasta 6.7 cmol(+)/L), K (entre 0.5 y 0.7 cmol(+)/L) y el pH (entre 5.7 y 6.4), para las condiciones del Pacífico Seco de Costa Rica (Guanacaste). En la Zona Norte de Costa Rica, un mayor crecimiento se asocia con mayores concentraciones de P en el suelo, mientras que los menores se asocian con altas concentraciones de Al (entre 7 y 75% de saturación de acidez en Sarapiquí, Costa Rica) y Fe en el suelo.

Varios estudios mencionan que el problema de suelos compactados afecta negativamente el crecimiento, lo cual se relaciona con incrementos en la densidad aparente y los años de uso anterior del terreno (e.g. Obando 1989). En el Pacífico Seco de Costa Rica bajo las condiciones de

suelo estudiadas (Vásquez y Ugalde 1994, Vallejos 1996), la especie se ve desfavorecida con aumentos en la elevación sobre el nivel del mar (entre 50 y 510 msnm), la velocidad del viento y cuando es plantada en las partes medias y altas de las pendientes (Cuadro 6).

En el caso de las condiciones del Pacífico Seco de Guanacaste, Vallejos (1996) reporta que los sitios de alto rendimiento para la producción de madera en rollo de *G. arborea* presentan un pH entre 5.7 y 6.3, una acidez de 0.1, concentraciones (cmol(+)/L) de Ca entre 18 y 23, de Mg entre 6.2 y 6.7, de K entre 0.3 y 0.7 y de P de 0.6 ppm. Los sitios de bajo rendimiento se diferencian en que presentan una concentración de Ca entre 6 y 16, y de K menor a 0.3 cmol(+)/L.

Bombacopsis quinatum (Cuadro 7)

La especie *B. quinatum* requiere de una buena distribución de lluvias durante el año para su buen desarrollo. Su crecimiento disminuye

Cuadro 7. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Bombacopsis quinatum*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
5 sitios en Costa Rica (Pacífico Seco, Pacíf. Central, Pacíf. Sur, Atlántico Norte)	Inceptisol Entisol Alfisol	Precipitación media anual (+) Número de meses secos (+) Número de meses muy secos < 30 (-)	Pendiente (-)	% Arcilla horizonte A y B (-) % Arena ambos horizontes (+)	IS=16.4507 + 1.315 número meses secos - 0.1057 % arcilla	Navarro (1987)
$R^2 = 67\%$						
Guanacaste, Costa Rica	Inceptisol Entisol Alfisol Ultisol	Viento (-) Precipitación media anual (+)		[Mg] primer horizonte (+) [Ca] primer horizonte (+)	IS = 14.819 - 2.408 viento + 0.362 Mg	Vásquez y Ugalde (1994)
$R^2 = 55\%$						
Guanacaste, Costa Rica	n.r.		Pendiente (-)	[Ca] primer horizonte (+)	IS = 11.04 - 1.53log (pendiente) + 0.264 (Ca)	Vallejos (1996)
$R^2 = n.r.$						

cuando el número de meses secos aumenta (entre 0 y 4 meses secos con menos de 30 mm), los vientos son fuertes y conforme aumenta el grado de pendiente del terreno (entre 0 y 40% para las condiciones del Pacífico Seco). Bajo las condiciones de estudio en Costa Rica, no se reporta ningún factor físico del suelo que afecte el crecimiento de *B. quinatum*, excepto que se desarrolla mejor en suelos de texturas medias. También, la especie crece mejor conforme aumentan los contenidos de Ca (entre 2 y 32 cmol(+)/L) y Mg (entre 2 y 12 cmol(+)/L) en el suelo (Cuadro 7).

Para las condiciones del Pacífico Seco de Guanacaste, Vallejos (1996) reporta que los sitios de alto rendimiento para la producción maderera con esta especie presentan un pH entre 6.1 y 6.3, una acidez cercana a 0.1, concentraciones (cmol(+)/L) de Ca entre 19 y 25, de Mg entre 0.4 y 0.6 y de P entre 4.5 y 7.8 ppm.

Cordia alliodora (Cuadro 8)

El mejor crecimiento de *Cordia alliodora* se da en suelos aluviales fértiles, por lo cual la espe-

cie tiende a crecer menos en suelos ácidos (Graves y McCarter 1990) (Cuadro 8). Para su buen crecimiento la especie requiere de un horizonte A bien desarrollado, alta disponibilidad de K y suelos poco compactados. En general crece mejor en sistemas agroforestales (Graves y McCarter 1990).

Tectona grandis (Cuadro 9)

Dos estudios que relacionan la calidad de sitio con factores ambientales se han realizado para *T. grandis*, ambos en el Pacífico Seco de Costa Rica (Cuadro 9). La precipitación media anual y la temperatura media anual han sido los principales limitantes climáticos encontrados. La profundidad del suelo y la posición topográfica (las partes bajas de la pendiente favorecen el crecimiento) afectan el desarrollo de la especie. Mientras tanto, la resistencia a la penetración del suelo y la concentración de Ca han sido los principales factores edáficos señalados como limitantes para *T. grandis* (Cuadro 9).

Vallejos (1996) reporta que los sitios de alto rendimiento de *T. grandis* en el Pacífico

Cuadro 8. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Cordia alliodora*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Zona Norte, Costa Rica	Nitisol Rojizo (>[Al])		Grosor horizonte A (+)	K disponible (+) Grosor horizonte A (GA) (+) D aparente(da) (+) Uso anterior del sitio (+)	Inc = 71 + 0.2 GA - 10 pH H ₂ O - 34 K 30 cm R ² = 70%	Bergmann <i>et al.</i> (1994)
	Cambisol Café			K disponible (+) Grosor horizonte A (+) Densidad aparente (da) (+) Uso anterior del sitio (+)	Inc = 92 - 76 da - 61K ₃₀ cm - 0.2 Sat Al ₃₀ cm R ² = 85%	
Zona Norte, Costa Rica	n.r.		Compactación, Grosor horizonte A (GA) Pendiente Distancia de cima Forma del terreno	Densidad aparente (da) (-)	Inc = 7.1 - 9.2 da + 0.43 uso anterior + 0.4 GA + 0.47 distancia de la cima R ² = n.r.	Zech (1994)

- Inc = Incremento en altura (cm/mes)

Cuadro 9. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Tectona grandis*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Guanacaste, Costa Rica	Inceptisol Alfisol	Precipitación media anual (pma) (+)	Posición topográfica (-) Profundidad del suelo (+)	Déficit hídrico (-) Ca, Fe (-)	IS = 2.206 + 0.007 pma + 0.176 Ca R ² = 44.6 %	Vásquez y Ugalde (1994)
	n.r.	Temperatura media anual (tma) (-) Déficit hídrico (-)		Ca Resistencia a la penetración (-)	IS = 119.00 - 3.99 tma - 0.34 resistencia a la penetración + 0.264 Ca R ² = 67.6 %	

Cuadro 10. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para la especie *Cupressus lusitanica*.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficos/ topográficos	Edáficos		
Valle Central y Valle del General, Costa Rica	n.r.	Precipitación media anual > a 1150 mm (+)		Prof suelo (+) Permeabilidad (+) Drenaje (+) Acidez (-)	No se construyó	Goitia (1954)
Valle Central, Costa Rica	n.r.			% Arcilla (+) Densidad real (-) %Limo (-) Retención humedad (-)	IS = 57.557 - 14.952 log % limo + 0.1332 % arcilla - 0.28 % poros + 0.83 % agua disponible	Alfaro (1983)
$R^2 = 61\%$						

Seco de Costa Rica presentaron un pH entre 6.6, y 6.2, una acidez cercana a 0.1, concentraciones (cmol(+)/L) de Ca entre 21 y 30, de Mg entre 6 y 9, de K alrededor de 0.1 y 0.3 y de P cercana a las 6 ppm. Mientras que los sitios considerados de bajo rendimiento presentaron entre 1.5 y 1.7 ppm de P, y concentraciones de Ca entre 16 y 17 y Mg entre 5 y 5.6 cmol (+)/L.

Cupressus lusitanica (Cuadro 10)

Los estudios llevados a cabo en Costa Rica indican que *C. lusitanica* presenta los mejores rendimientos en sitios con una precipitación promedio anual superior a 1150 mm, cuando los suelos son profundos (> 1.80 m), permeables, de buen drenaje y sin problemas de acidez.

Otras especies forestales (Cuadro 11)

Debido a que para las siguientes especies forestales hay un único estudio por especie, estas se discuten en conjunto. En términos generales el crecimiento de *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium* se ve favorecido en suelos de alta fertilidad (lo que indica contenidos adecuados de Ca, Mg, K, P, Mn, Zn y Cu, buena disponibilidad de humedad y texturas medias (Cuadro 11).

Por el contrario, el desarrollo de *Vochysia ferruginea* se ve afectada positivamente por bajas concentraciones de P (entre 2.5 y 11.5 mg/L) y altas concentraciones de Fe (entre 150 y 400 mg/L) y Mn (entre 14 y 123 mg/L) en el sistema. Varios estudios (Montagnini y Sancho 1994, Pérez et al.

1993, Herrera y Finegan 1997) mencionan la alta concentración foliar de Al en *V. ferruginea*, con valores inusitados (superiores a 10.000 ppm) con relación a otras especies forestales tropicales (Dreschel y Zech 1991). Di Stefano y Fournier (1994) encontraron una respuesta negativa en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* a la aplicación de fertilizante fosfatado. Esta especie muestra concentraciones de Al foliar superiores a las de *V. ferruginea* (Pérez et al. 1993).

LA CALIDAD DE SITIO Y ALGUNOS ASPECTOS RELACIONADOS CON LOS MODELOS MATEMATICOS

Los avances en el conocimiento y empleo de métodos estadísticos han permitido mejorar los modelos matemáticos. El primer estudio publicado en los años 50 (Goitia 1954), se basó únicamente en técnicas cualitativas para clasificar los sitios. Para los años 70 (Isolán 1972, Jadan 1972), en los estudios se utilizaron principalmente técnicas univariadas (e.g. correlaciones simples), mientras que en la década de los 80 se comienza a utilizar técnicas de regresión múltiple (e.g. regresión por pasos) para asociar el incremento en altura, la altura dominante y el índice de sitio con variables ambientales. Estos esfuerzos se hacían con fines principalmente predictivos, más que con la idea de estudiar la relación causa-efecto. En este sentido, los estudios de Herrera (1996), Revolorio (1996) y Vallejos (1996) tratan de considerar esta situación de manera que los

Cuadro 11. Resumen de los estudios sitio-suelo realizados en Centroamérica para otras especies importantes en proyectos de reforestación.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Climáticos	Factores limitantes			Modelo	Fuente
			Fisiográficos/ topográficos	Edáficos			
<i>Leucaena leucocephala</i>	Centroamérica	Inceptisol	Zona de vida	Altitud (-)	%Arcilla (-)	IS=6,99 - 0,00480 + 1.19 uso anterior - 0.120 P ₁₅₋₄₀ + 0.620 Zn ₀₋₁₅ - 0.131 Cu ₁₅₋₄₀ R ² = 59.9%	Campos (1989)
		Entisol	Meses secos	Pendiente (-)	%Mat. org. (-)		
		Alfisol	<100 mm	Erosión (-)	Agua disponible (+)		
		Ultisol		Relieve (-)	Sumatoria bases (+)		
		Molisol		Drenaje (+)	Ca+Mg/K (+)		
Vertisol		Uso anterior (-)	Al, %Sat Al (-) P, Mn, Zn, Cu (+)				
<i>Gliricidia sepium</i>			Zona de vida	Altitud (-)	%Arena (-)	IS = 7.21 - 0.00207 altitud - 0.655 meses secos < 80 mm - 0.0895 Sat. Ca ₀₋₁₅ + 1.24 pH ₁₅₋₄₀ + 0.0346 Mn ₀₋₁₅ R ² = 49.8 %	Campos (1989)
			Meses secos	Pendiente (-)	%Limo (-)		
			<80\ mm (-)	Relieve (-)	%Mat. org. (-)		
				Drenaje (+)	Retención agua		
				Uso anterior (-)	Ca, Ca/Mg, K, pH, Mn, Zn, Cu		
<i>Vochysia ferruginea</i>	Florencia San Carlos, Costa Rica (Bosque secundario)	Inceptisol		P (-), Mn (+)		H dom = 53.93 - 1.25 P + 0.0388 Mn - 2.02 % mat. org. - 0.299 % arcilla R ² = 79.5%	Herrera (1996)
		Ultisol		% Arcilla (-)			
				% Materia orgánica (-) Fe (-), Cu (+)			

modelos estadísticos puedan emplearse no sólo para seleccionar los mejores sitios, sino para dilucidar factores de sitio que afecten en mayor proporción el crecimiento de los árboles.

Por su parte, las técnicas estadísticas que se empleen en la construcción de los modelos deben de manejarse en forma efectiva, tomando en cuenta las limitaciones que ofrece la técnica estadística aplicada. Consideraciones especiales deben de tenerse respecto al diseño de muestreo y la selección de variables para la construcción de los modelos, sobre todo lo relacionado con el número de variables en el modelo y la multicolinealidad que presenten, y generando modelos de aplicación simple, pero de alto poder predictivo, aspectos que se han desarrollado poco, con algunas excepciones, en los estudios de esta índole.

SINTESIS GENERAL

En lo que se refiere a los aspectos relacionados con la metodología empleada en estos estudios, en la mayoría de los casos el índice de sitio ha sido la variable indicadora del potencial productivo del sitio. Además, no existe un criterio uniforme para la selección de los sitios de estudio, ni un tamaño y número de parcela definido. Debido a la repercusión de estos aspectos sobre la precisión de los resultados de estos estudios, es necesario desarrollar investigaciones específicas al respecto.

Muy al contrario de lo que se pensaba en años anteriores, cuando se consideraban como tierras forestales aquellas que no presentaban ningún potencial para agricultura y ganadería (Alvarado et al. 1997), los estudios discutidos en el presente trabajo demuestran que los suelos degradados, infértiles, poco profundos y mal drenados tampoco son aptos para una producción forestal de alto rendimiento. No obstante, no se puede generalizar en este aspecto, ya que especies como *V. ferruginea*, aparentemente, se adaptan a suelos con altas concentraciones de acidez y bajas condiciones de fertilidad natural del suelo. A pesar de que los estudios que estiman la calidad de sitio a partir de factores ambientales permiten tener una buena aproxima-

ción de las condiciones y recursos ambientales necesarios para el buen rendimiento de las especies, se hace imperativo desarrollar estudios que recomienden puntualmente cual es el nivel óptimo en la concentración de los nutrimentos del suelo para obtener una producción forestal de alto rendimiento.

Por su parte, el esfuerzo de las investigaciones ha sido dirigido hacia plantaciones forestales, iniciándose a partir de 1993 el empleo de esta técnica en bosques tropicales naturales coetáneos de la región, tanto en bosques dominados por coníferas como bosques secundarios de especies latifoliadas. Estos bosques son de gran importancia en las economías locales de los países centroamericanos, por lo se hacen necesarias investigaciones que contribuyan a su utilización racional. También se hace necesario el diseño de metodologías para la determinación de la calidad de sitio en bosques tropicales primarios latifoliados discontínuos, campo que a nivel centroamericano ha sido muy poco explorado.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a F. Bertsch, A. Chaverri, G. Galloway y L. Fournier por los valiosos comentarios al documento. A.T. Orlich por colaborar en la edición del mismo. El financiamiento de este trabajo fue aportado por la Cooperación Suiza al Desarrollo (COSUDE).

LITERATURA CITADA

- ALFARO, M. 1983. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el Valle Central, Costa Rica. Tesis licenciatura. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 111 p.
- ALVARADO, A.; CAMPOS, J.J.; HERRERA, B. 1997. Evolución del manejo y clasificación de tierras para uso forestal en América Central. In III Semana Científica del CATIE (3-5, febrero, 1997, Turrialba, Costa Rica). CATIE, Turrialba, Costa Rica. p. 1-7.
- ALDER, D. 1980. Forest volume estimation and yield prediction. FAO. Forestry Paper No. 2. Vol. 22. 194 p.

- BERGMANN, C.; STUHRMANN, M.; ZECH, W. 1994. Site factors, foliar nutrient level and growth of *Cordia alliodora* plantations in the humid lowlands of Northern Costa Rica. *Plant and Soil* 166: 193-202.
- CALVO, J.; CAMACHO, D. 1992. Algunos factores ambientales asociados con el crecimiento de Gmelina arborea Roxb en la Zona Norte de Costa Rica. *In* II Congreso Nacional Forestal (San José, 25-27 agosto 1992). San José, Costa Rica. p. 43-45.
- CAMPOS, J.J. 1989. Environmental effects on the productivity of *Eucalyptus camaldulensis*, *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium* in Central America. Thesis Doc. Phill. Oxford University. 156 p. (sin apéndices).
- CANET, G.; CHAVARRIA, M.; GAMBOA, O. et al. 1996. Información estadística relevante sobre el Sector Forestal. Ministerio del Ambiente y Energía, Sistema Nacional de Areas de Conservación, Area de Fomento. San José, Costa Rica. 48 p. (mimeografiado).
- CARMEAN, W. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Adv. Agron.* 27:209-269.
- CLUTTER, J.; FORTSON, J.; PIENAAR, L.; BRISTER, H.; BAYLEY, R. 1983. Timber management: a quantitative approach. New York, Wiley. 333 p.
- COILE, T.S. 1935. Relationship of site index for short-leaf pine to certain physical properties of the soil. *Journal of Forestry* 33: 726-730.
- CHAVARRIA, M.I. 1996. Clasificación preliminar de calidades de sitio y factores asociados con el crecimiento del *Eucalyptus deglupta* Blume para la Región Hueta Norte de Costa Rica. Tesis licenciatura. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 101 p.
- Di STEFANO, J.F.; FOURNIER, L.A. 1994. Crecimiento inicial de *Vochysia guatemalensis* en Tabarcia de Mora, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(1):41-46.
- DRECHSEL, P.; ZECH, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant Soil* 131:29-46.
- FINEGAN, B. 1996. Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession. *Trends Ecol. & Evol.* 11(3):119-124.
- GOITIA, J.E. 1954. Estudio del incremento volumétrico del *Cupressus lusitanica* Mill en relación a la edad y al sitio. Tesis M.Sc. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 71 p.
- GRAVES, A.; McCARTER, P. 1990. *Cordia alliodora* a promising tree for tropical agroforestry. *Tropical Forestry Papers* 22. Oxford Forestry Institute, University of Oxford. 37 p.
- GUTIERREZ, E.; MIZE, C.W. 1993. A quantitative model for relating species and tropical forest sites: a synecological study. *Rev. Biología Tropical* 41(1):7-21.
- HAIG, I.T. 1929. Colloidal content and related factors as indicators of site quality. *Yale Univ. School of Forestry Bull.* 24.
- HERRERA, B. 1996. Evaluación del efecto del sitio en la productividad de las poblaciones de dos especies dominantes en un bosque tropical de la tercera fase de la sucesión secundaria en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 152 p.
- HERRERA, B.; FINEGAN, B. 1997. Substrate conditions, foliar nutrients and the distributions of two canopy tree species in a Costa Rican secondary rain forest. *Plant Soil* 191: 259-267.
- ISOLAN, F.B. 1972. Estudio da qualidade de sitio para *Pinus caribaea* MOROLET var *hondurensis* Barret e Goulet no cantao de Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. IICA, Turrialba. Costa Rica. 83 p.
- JADAN, S. 1972. Sistemas de clasificación de índice de sitios para *Eucalyptus deglupta* BL en Turrialba, Costa Rica. Tesis Magister Science. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 99 p.
- KILIAN, W. 1981. Site classification systems used in forestry. *In* Workshop and land evaluation for forestry. International Workshop of the IUFRO/ISSS (November 1980, Wagenigen, The Netherlands) [Proceedings]. Ed. by P. Laban. ILRI, The Netherlands. p. 134-151.
- KLINGEBIEL, A.A.; MONTGOMERY, P.H. 1961. Land capability classification. *USDA Soil Conservation Handbook* (210).
- MONTAGNINI, F.; SANCHO, F. 1994. Nutrients budgets of young plantations with native trees: strategies for sustained management. *In* Forest resources and wood-based biomass energy as rural development assets. Ed. by W. Bentley and M. Gowen. New Delhi, Winrock International and Oxford & IBH Publishing Co. p. 213-233.
- NAVARRO, C. 1987. Evaluación del crecimiento y rendimiento de *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand en

- 15 sitios de Costa Rica. Indices de sitio y algunos factores financieros de la especie. Tesis Mag. Sc. UCR/CATIE. Turrialba, Costa Rica. 137 p.
- OBANDO, G. 1989. Construcción de modelos matemáticos de clasificación de sitios para la especie *Gmelina arborea* Roxb., aplicables a la Zona Pacífico Sur de Costa Rica. Informe de Práctica de Especialidad. Dep. de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 118 p.
- ORTEGA, H. 1986. Factores edáficos y topográficos que determinan la calidad de sitio en plantaciones jóvenes de *Pinus caribaea* var *hondurensis* en Pavones. Tesis M.Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 100 p.
- ORTEGA, A.; MONTERO, G. 1988. Evaluación de la calidad de sitio de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología (Esp)* (2):155-184.
- PEREZ, J.; BORNEMISZA, E.; SOLLINS, P. 1993. Identificación de especies forestales acumuladoras de aluminio en una plantación experimental ubicada en Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2):99-103.
- PLATH, C.V. 1967. Productive capacity of agricultural land in Central America. FAO, Rome, Italy.
- REVOLORIO, A. 1996. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 144 p.
- SANCHEZ, A. 1994. Crecimiento de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* bajo 3 sistemas de plantación a nivel de finca, en la Zona de Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica.
- SEGURA, O. 1992. Los incentivos forestales en Costa Rica: políticas económicas del sector. EFUNA. Serie Política Económica No. 5. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 63 p.
- SHENG, T.C. 1971. Proyecto de clasificación de la capacidad de uso de la tierra orientada a su tratamiento. Para tierras marginales montañosas del trópico húmedo. FAO. Kingston, Jamaica.
- STUHRMANN, M.; BERGMANN, C.; ZECH, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. *For. Ecol. Manage.* 70:135-145.
- VALDES, M.C.; STIFF, C.; DECHERT, T.V. 1994. Determinación de calidad de sitio y productividad del *Pinus oocarpa* en base a características ambientales en la zona central de Honduras. *Interciencia (Mex)* 19(6):336-342.
- VALLEJOS, 1996. Productividad y relaciones con el índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 142 p.
- VANCLAY, J. 1994. Modelling forest growth and yield, applications to mixed tropical forest. Wallingford, United Kingdom. CAB International. 312 p.
- VASQUEZ, W. 1987. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. Tesis M.Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- VASQUEZ, W.; UGALDE, L. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea*, en Guanacaste, Costa Rica. Informe final. Convenio de Cooperación IDA/FAO-CATIE. Turrialba, Costa Rica. 43 p.
- VINCENT, L. 1980. Manejo de plantaciones forestales con fines de producción. Universidad de los Andes. Facultad Ciencias Forestales. Centro de Estudios de Postgrado. Dpto. Manejo de Bosques. Mérida, Venezuela. 90 p.
- ZEASER, D.; MURILLO, R. 1992. Evaluación de los factores edáficos limitantes al crecimiento temprano de melina (*Gmelina arborea* Roxb) plantado en suelos inceptisoles en la Región Brunca de Costa Rica. In II Congreso Nacional Forestal (San José, 25-27 agosto 1992). San José, Costa Rica. p. 55-57.
- ZECH, W. 1994. Metodología práctica para la identificación de sitios para reforestación en la Zona Norte de Costa Rica, en especial con melina y laurel. Documento del Proyecto No. 39. COSEFORMA. San José, Costa Rica. 53 p.