

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSTGRADO

// PRODUCTIVIDAD Y RELACIONES DEL 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

POR

OSCAR SANTIAGO VALLEJOS BARRA



Turrialba, Costa Rica
1996

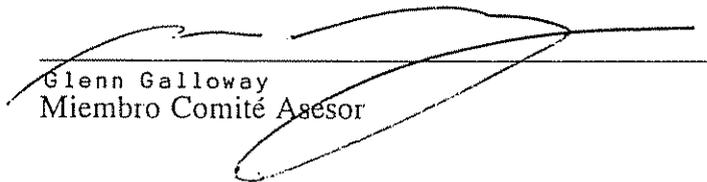
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

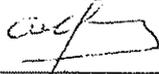
FIRMANTES:



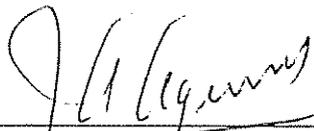
Luis Ugalde
Profesor Consejero



Glenn Galloway
Miembro Comité Asesor



Alfredo Alvarado
Miembro Comité Asesor



Juan A. Aguirre
Jefe, Area de Postgrado



Pedro Ferreira
Director, Programa de Enseñanza



Oscar Santiago Vallejos Barra
Candidato

DEDICATORIA

A Nuestro Señor Jesús

A todos mis seres queridos, fuente de inspiración permanente

A mi largo, angosto y querido país, Chile

AGRADECIMIENTOS

El autor desea brindar los más sinceros agradecimientos a las siguientes personas:

- Al Comité Asesor: Luis Ugalde , Ph.D., Glenn Galloway, Ph.D.y Alfredo Alvarado Ph.D.

- A los buenos docentes que tuve, por mostrarme el camino a seguir.

- Al gobierno Español por ayudar a financiar mis estudios con la beca parcial Muttis

- A mi querida amiga María Eugenia Mendoza, por todo lo que me enseñaste.

- A mis amigos Blanca, René y Magdalena. por su comprensión y paciencia.

- Al señor Edgar Viquez, funcionario de MACORI, por tu valioso apoyo y comprensión

- A las autoridades de la Universidad de Talca, por autorizar mi perfeccionamiento

BIOGRAFIA

El autor nace en la ciudad de Rancagua, Chile, el 21 de abril de 1965.

Inicia sus estudios básicos en el año 1971, finalizándolos en 1982. A partir de 1983 comienza sus estudios universitarios de Ingeniería Forestal en la Universidad de Concepción sede Chillán, Chile, finalizándolos en 1988, compartiendo junto a otro compañero el primer lugar de su promoción.

A partir de 1991, se desempeña como docente de las cátedras dasometría I y II, en la Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad de Talca, Talca, Chile. En 1995 ingresa al Programa de Estudios de Postgrado del CATIE y en 1996, obtiene el grado de Magister Scientae en Recursos Naturales Renovables, con especialidad en Manejo y Silvicultura de Bosques Tropicales, correspondiéndole el honor de ser el primer promedio de su promoción en tal especialidad.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	xiv
SUMMARY	xviii
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general:	3
2.2. Objetivos específicos:	3
3. HIPOTESIS DE TRABAJO:	4
4. REVISION DE LITERATURA	5
4.1. Descripción y requerimientos de las especies consideradas en este estudio	5
4.1.1. <i>Tectona grandis</i> L. F.	5
4.1.2. <i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq.) Dugand	6
4.1.3. <i>Gmelina arborea</i> Roxb.	7
4.2. Calidad de sitio e Índice de sitio	8
4.3. Métodos de evaluación de calidad de sitio	8
4.3.1. Método directo	8
4.3.2. Método indirecto	9
4.3.2.1. Índice de sitio dasométrico	9
4.3.2.2. Índice de sitio vegetacional	10
4.3.2.3. Índice de sitio ambiental	10
4.4. Análisis foliar	21
4.5. Productividad	27
4.6. Validación	28
5. MATERIALES Y METODO:	32
5.1. Localización área de estudio	32
5.2. Materiales	32

5.3. Método	36
5.3.1 Labores de campo	36
5.3.1.1. Tamaño muestral	36
5.3.1.2. Ubicación y medición de las parcelas	38
5.3.1.3. Muestreo de suelos y foliar	38
5.3.1.4. Variables contenidas en el estudio	38
5.3.2 Labores de Oficina	53
5.3.2.1. Generación y depuración de base de datos	53
5.3.2.2. Determinación del índice de sitio	53
5.3.2.3. Determinación de la productividad	55
5.3.2.4. Relación del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares.	56
5.3.2.5. Validación de los modelos	56
5.3.2.6. Análisis foliar	56
5.3.2.7. Ensayo de introducción de especies	57
6. RESULTADOS Y DISCUSION	58
6.1. Obtención del modelo de índice de sitio	58
6.2. Productividad	66
6.3. Relación del índice de sitio con variables fisiográficas, climáticas y edáficas	75
6.3.1. Variables fisiográficas y climáticas	75
6.3.2. Variables edáficas	86
6.3.3. Modelos predictivos del índice de sitio	96
6.4. Validación	99
6.5. Análisis foliar	102
6.6. Procedencia	117
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
8. LITERATURA CITADA	126
9. ANEXO	132

LISTA DE CUADROS EN EL TEXTO

CUADROS	Página
1 Listado de investigaciones que han presentado ajustes estadísticos satisfactorios, relacionando variables fisiográficas y/o climáticas y/o edáficas con el índice de sitio	15
2 Resultado de la recopilación hecha por Drechsel y Zech (1991), para los nutrimentos foliares considerados en este estudio para <i>T. grandis</i> y <i>G. arborea</i>	23
3 Metodología utilizada para el análisis foliar según autor y año de publicación	26
4 Rangos para el IMA en área basal para las especies en análisis, según Vásquez y Ugalde (1995) en la provincia de Guanacaste, Costa Rica.	27
5 Expresiones posibles del sesgo en la función de índice de sitio	28
6 Evaluación de la exactitud de la estimación de la función de índice de sitio	30
7 Tamaños muestrales según especie y tipo de análisis a desarrollar, para la presente investigación y la llevada a cabo por Vásquez y Ugalde (1994)	36
8 Listado de localización de los sitios y parcelas analizadas en el presente estudio, según cantón y especie	37
9 Promedio de variables de los árboles de la totalidad de parcelas, según especie, cantón y localización del sitio.	41
10 Promedio por sitio de características climáticas y fisiográficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio	45
11 Promedio por sitio de características edáficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.	50
12 Supuestos del método de los mínimos cuadrados y pruebas estadísticas aplicadas en cada caso, según Gujarati (1993)	54
13 Resumen de los modelos de índice de sitio, según especie	58
14 Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos seleccionados	59
15 Resultado de la aplicación del error cuadrático medio, según especie y modelo	59
16 Clasificación de las parcelas, según especie bajo cinco clases de índice de sitio, a una edad base de 10 años.	60

CUADROS

	Página
17 Numero de parcelas y promedio del índice de sitio segun clase de sitio, cantón y especie	64
18 Resumen de las estadísticas descriptivas de las variables dasométricas analizadas, segun especie	66
19 Clasificación en cinco clases de crecimiento y productividad, de las especies analizadas, segun variable	70
20 Resumen de la distribución en clases de crecimiento o productividad (Excelente y Marginal) según especie, variable, cantón y sitio	72
21 Resumen de las variables cuantitativas fisiográficas y climáticas promedios, segun especie y clase de índice de sitio	76
22 Resumen porcentual de las variables discretas fisiográficas y climáticas para diferentes códigos de cada variable, segun especie y clase de sitio	77
23 Niveles críticos de elementos para la interpretación de suelos	86
24 Distribución porcentual por especie, de los sitios contemplados en este estudio, utilizando la clasificación de Bertsch (1987)	86
25 Resumen de las variables edáficas químicas y físicas promedios por profundidad del suelo, clase de sitio y especie	88
26 Variables que conforman los modelos predictivos del índice de sitio, seleccionadas a través del procedimiento Stepwise, según tipo de variable y especie	97
27 Modelos predictivos del índice de sitio segun profundidad del suelo y especie	98
28 Resumen de los modelos de predicción de índice de sitio, según especie y profundidad del suelo para los modelos de predicción del índice de sitio.	99
29 Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos predictivos del índice de sitio, según especie y profundidad del suelo.	99
30 Clasificación del sesgo, en base al procedimiento descrito por Vallejos (1979), según especie y profundidad del suelo	100
31 Exactitud de los modelos en base a la aplicación de la prueba de Freese (1960), segun especie y profundidad del suelo	101
32 Resumen de las estadísticas descriptivas del análisis foliar segun especie, nutrimento y sitio (edades 2 - 5 años)	103
33 Comparación del contenido nutricional foliar entre lotes de un mismo sitio mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio.	105

CUADROS

Página

34 Comparación del contenido nutricional foliar entre sitios mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio	106
35 Comparación del contenido nutricional foliar por edad, mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio	108
36 Coeficiente de correlación entre el porcentaje de contenido foliar y variables explicativas según especie.	109
37 Modelos de predicción del contenido foliar nutricional, según especie y nutrimento estimado	110
38 Análisis de varianza y de correlación para los modelos predictivos del contenido nutricional foliar, según especie y modelo	110
39 Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos predictivos del contenido nutricional foliar, según especie y modelo	111
40 Resultado del análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples SNK, del ensayo procedencias de <i>T. grandis</i> de siete años, en Barra Honda, provincia de Guanacaste, Costa Rica	118

LISTA DE CUADROS DEL ANEXO

CUADROS	Página
1a Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para los modelos de índice de sitio generados, según especie	132
2a Numero de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie	133
3a Matriz de correlación entre variables consideradas para <i>Tectona grandis</i> L. f	138
4a Matriz de correlación entre variables consideradas para <i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq.) Dugand	139
5a Matriz de correlación entre variables consideradas para <i>Gmelina arborea</i> Roxb.	140
6a Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para la relación entre índice de sitio y variables fisiográficas, climáticas y edáficas, según especie y pr	141
7a Detalle de la prueba de validación (clasificación del sesgo y evaluación de la exactitud) propuesta por Freese (1960) y modificada por Vallejos (1979), según especie y profundidad del suelo (1ª = 0 - 20 cm, 2ª = 20 - 40 cm)	142
8a Análisis de varianza de las variables químicas foliares, según tipo de análisis	143
9a Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para los modelos de índice de sitio generados, según especie	145
10a Análisis de varianza del ensayo de procedencia, según variable estudiada	147

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	Página
1 Expresiones posibles del sesgo en la función de índice de sitio	29
2 Localización de los sitios con parcelas de T. grandis	33
3 Localización de los sitios con parcelas de B. quinatum	34
4 Localización de los sitios con parcelas de G. arborea	35
5 Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de T. grandis, contempladas en este estudio	61
6 Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de B. quinatum, contempladas en este estudio	62
7 Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de G. arborea, contempladas en este estudio	63
8 Volumen total (V1) y comercial (V2) de la totalidad de parcelas de B. quinatum	68
9 Volumen total (V1) y comercial (V2) de la totalidad de parcelas de G. arborea	69
10 Relación entre la elevación del terreno y el índice de sitio, para G. arborea	78
11 Relación de la temperatura media anual con el índice de sitio, para T. grandis	79
12 Relación entre déficit hídrico y el índice de sitio, para T. grandis	80
13 Relación entre la pendiente y el índice de sitio, para B. quinatum	81
14 Relación entre la posición topográfica y el índice de sitio, para G. arborea	82
15 Relación entre pedregosidad y el índice de sitio, para T. grandis	83
16 Relación entre el viento y el índice de sitio, para T. grandis	84
17 Relación entre el viento y el índice de sitio, para G. arborea	85
18 Relación entre el viento y el índice de sitio, para B. quinatum	85
19 Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para T. grandis	90

FIGURAS	Página
20 Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para B quinatum	91
21 Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para G. arborea	91
22 Relación entre calcio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para T grandis	92
23 Relación entre magnesio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para T. grandis	93
24 Relación entre potasio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para T grandis	94
25 Relación entre fósforo a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para G arborea	95
26 Relación entre resistencia a la penetración y el índice de sitio, para T grandis	96
27 Relación entre el contenido de limo del suelo y el contenido de calcio foliar en T grandis	112
28 Relación entre el contenido de limo en el suelo y el contenido de magnesio foliar en T. grandis	112
29 Relación entre el contenido de limo y contenido de fósforo foliar en B quinatum	113
30 Relación entre el contenido de magnesio foliar y el contenido de calcio foliar, en T grandis	114
31 Relación entre contenido de calcio en el suelo y contenido de calcio foliar en T grandis	115
32 Relación entre contenido de calcio en el suelo y contenido de magnesio foliar en T grandis	115
33 Relación entre contenido del suelo y foliar de fósforo en T. grandis	116
34 Relación entre contenido del suelo y foliar de potasio en B. quinatum	117

VALLEJOS. O. 1996. Productividad y relaciones del 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 Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica. CATIE. 142 p.

Palabras claves: *Tectona grandis* L. f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand, *Gmelina arborea* Roxb., índice de sitio, crecimiento, productividad, análisis foliar ensayo introducción de especie.

RESUMEN

Se utilizó dos métodos indirectos para determinar la calidad de los sitios analizados en el presente estudio: el método indirecto dasométrico, para conocer el estado actual de las plantaciones y el método indirecto ambiental, para pretender orientar a los reforestadores, sobre los mejores sitios para llevar a cabo plantaciones de *Tectona grandis* L. f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb, en Costa Rica.

Los modelos generados para la estimación del índice de sitio, mediante el método indirecto dasométrico, los cuales cumplieron todos los supuestos que tiene el método de los mínimos cuadrados, fueron los siguientes:

Tectona grandis L. f., n = 664, r² = 0.49

$$\ln(\text{IS}) = \ln(\text{Hdom}) + 1.8253 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.5162}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.5162}} \right)$$

Bombacopsis quinatum (Jacq.) Dugand, n = 306, r² = 0.73

$$\ln(\text{IS}) = \ln(\text{Hdom}) + 5.1101 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.2361}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.2361}} \right)$$

Gmelina arborea Roxb, n = 62, r² = 0.29

$$\ln(\text{IS}) = \ln(\text{Hdom}) + 1.5830 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.6533}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.6533}} \right)$$

Dichos modelos permitieron generar una clasificación en base al índice de sitio y al incremento en altura dominante a los 10 años (Cuadro 1), considerando percentiles de la distribución del índice de sitio (Marginal menor al percentil 12.5, Bajo superior al percentil 12.5 e inferior al percentil 37.5, Medio superior al percentil 37.5 e inferior al percentil 62.5, Alto superior al percentil 62.5 e inferior al percentil 87.5 y Excelente superior al percentil 87.5).

Cuadro 1: Clasificación de las parcelas, según especie bajo cinco clases de índice de sitio, a una edad base de 10 años.

Clase de Sitio	Especies (Edad base 10 años)					
	<i>Tectona grandis</i> L. f		<i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq.) Dugand		<i>Gmelina arborea</i> Roxb	
	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)
Marginal	≤ 13.34	≤ 1.33	≤ 7.79	≤ 0.77	≤ 12.10	≤ 1.21
Bajo	13.35 - 17.40	1.34 - 1.74	7.80 - 10.91	0.78 - 1.09	12.11 - 20.92	1.22 - 2.09
Medio	17.41 - 19.85	1.75 - 1.99	10.92 - 13.00	1.10 - 1.30	20.93 - 22.67	2.10 - 2.27
Alto	19.86 - 22.87	2.00 - 2.28	13.01 - 15.77	1.31 - 1.57	22.68 - 27.79	2.28 - 2.77
Excelente	≥ 22.88	≥ 2.29	≥ 15.78	≥ 1.58	≥ 27.80	≥ 2.78

El crecimiento y productividad de los sitios estudiados, fue clasificado de manera análoga a lo efectuado para el índice de sitio (Cuadro 2).

Cuadro 2: Clasificación en cinco clases de crecimiento y productividad, de las especies analizadas, según variable

<i>Tectona grandis</i> L. f						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.97	1.98 - 2.50	2.51 - 3.01	3.02 - 3.59	≥ 3.60
IMA-H	(m/año)	≤ 1.70	1.71 - 2.35	2.36 - 3.13	3.14 - 3.99	≥ 4.00
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 1.14	1.15 - 2.06	2.07 - 2.76	2.77 - 3.57	≥ 3.58
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 4.13	4.14 - 11.95	11.96 - 17.80	17.81 - 25.50	≥ 25.51
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 9.86	9.87 - 14.14	14.15 - 18.27	18.28 - 24.92	≥ 24.93

<i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq.) Dugand						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.16	1.17 - 1.69	1.70 - 2.17	2.18 - 3.05	≥ 3.06
IMA-H	(m/año)	≤ 0.71	0.72 - 1.01	1.02 - 1.25	1.26 - 1.60	≥ 1.61
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 0.16	0.17 - 0.49	0.50 - 1.20	1.21 - 2.21	≥ 2.22
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 0.19	0.20 - 0.96	0.97 - 3.75	3.76 - 9.72	≥ 9.73
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 4.97	4.98 - 6.83	6.84 - 8.75	8.76 - 15.52	≥ 15.53

<i>Gmelina arborea</i> Roxb						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.95	1.96 - 2.90	2.91 - 3.60	3.61 - 4.41	≥ 4.42
IMA-H	(m/año)	≤ 1.40	1.41 - 2.34	2.35 - 3.20	3.21 - 3.70	≥ 3.71
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 1.65	1.66 - 2.21	2.22 - 3.33	3.34 - 4.53	≥ 4.54
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 8.52	8.53 - 15.73	15.74 - 24.45	24.46 - 37.15	≥ 37.16
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 6.25	6.26 - 9.09	9.10 - 12.84	12.85 - 20.53	≥ 20.54

La clasificación de los sitios tanto por el índice de sitio y el crecimiento y productividad, dió resultados similares para lotes catalogados como Excelentes y como Marginales (Cuadro 3). Del mismo cuadro es posible observar que en un mismo sitio, se presentan lotes clasificados de manera radicalmente opuesta, evidenciando la alta variabilidad de microsítios existente en el trópico.

Cuadro 3. Clasificación de lotes dentro de sitios, según tipo de lote, clasificación usada y especie

Especie	Cantón	Lotes Excelentes	
		Índice de sitio	Crecimiento y productividad
		Lotes	Lotes
<i>T. grandis</i> L. f.	Nandayure	Moravia y Punta Coyote	Moravia y Punta Coyote
<i>B. quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Nicoya	Garza	Garza y Zapote
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Hojancha	Bajo Beneficio, Betania y Pilangosta	Betania

Especie	Cantón	Lotes Marginales	
		Índice de sitio	Crecimiento y productividad
		Lotes	Lotes
<i>T. grandis</i> L. f.	Bagaces	Bagaces	Bagaces
<i>B. quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Nandayure	Moravia y Punta Coyote	Río Tabaco
	Nicoya	Garza	
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Santa Cruz	Río Tabaco	La Virgen
	Bagaces	La Virgen	
	Cañas	Ganadería Montezuma	

El método indirecto ambiental que relaciona el índice de sitio con variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares, dio como resultado para *Tectona grandis* L. f. (n=64) que las variables más estrechamente correlacionadas con el índice de sitio fueron: déficit hídrico, temperatura media anual, resistencia a la penetración y contenido de calcio de 0-20 cm de profundidad, para *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) (n=42) Dugand fue: la pendiente y el contenido de calcio de 0-20 cm de profundidad y finalmente para *Gmelina arborea* Roxb. (n=33) fue: la posición topográfica, el viento y el contenido de calcio de 0-20 cm de profundidad. Por lo tanto las tres especies son eminentemente basófilas. Para ninguna especie, las variables foliares presentaron una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$) //

Los modelos que integran las variables antes señaladas, fueron validados usando el procedimiento desarrollado por Freese (1960) y modificado por Vallejos (1979). Resultando que solo el modelo propuesto para *Gmelina arborea* Roxb., fue insesgado y exacto. Los modelos propuestos son:

T. grandis L. f., primera profundidad del suelo, n = 64, r² = 0.49, 37% de exactitud

$$IS = \frac{25.432112 - 2.695521 \text{ DEFHID} + 0.268667 \text{ Ca}}{0.794}$$

T. grandis L. f., primera y segunda profundidad del suelo, n = 45, r² = 0.68, 27% de exactitud

$$IS = \frac{118.03081 - 3.989583 \text{ TMA} - 0.340751 \text{ RES} + 0.341109 \text{ Ca}}{0.851}$$

B. quinatum (Jacq.) Dugand, primera profundidad del suelo, n = 42, r²=0.34, 27% de exactitud

$$IS = \frac{9.942913 - 1.531195 \text{ Log (PEND)} + 0.264734 \text{ Ca}}{0.897}$$

G. arborea Roxb., primera profundidad del suelo, n=33, r²=0.59, 13% de exactitud

$$IS = 15.509609 + 2.084607 \text{ PTOPE} - 2.334711 \text{ VIENTO} + 0.188707 \text{ Ca}$$

Se relacionó el contenido de nutrientes foliares con los contenidos nutricionales del suelo, resultando para *Tectona grandis* L. f., que el contenido de calcio en el suelo (0-20 cm de profundidad), se encuentra altamente correlacionado (P< 0.01) con el contenido de calcio foliar (r²= 0.91) y magnesio foliar (r²=0.92). En ambos casos, la relación es positiva, lo cual confirma que esta especie es eminentemente basófila, ya que al aumentar en contenido de calcio en el suelo, aumenta el contenido foliar de calcio y magnesio. Para *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand, no se encontró una relación similar a la encontrada para *Tectona grandis* L. f., para calcio y magnesio, probablemente por que no había un sitio extremo que permitiera evidenciar tendencias claras entre las variables. Sin embargo, el contenido de potasio en el suelo, se presentó altamente relacionado (P<0.01) con el contenido de potasio foliar (r²= 0.63).

Finalmente mediante el análisis estadístico del ensayo de procedencias ubicado en Barra Honda, provincia de Guanacaste, Costa Rica, las procedencias mas promisorias para desarrollar programas de reforestación en el área en el Cantón de Nicoya resultaron ser: la procedencia Puntarenas y la procedencia Quepos, ambas de Costa Rica, con un Incremento medio anual en diámetro de 2.76 y 2.48 (cm/año) respectivamente, un Incremento medio anual en altura de 1.96 y 1.79 (m/año) respectivamente y un Incremento medio anual en volumen total de 12.42 y 11.41 (m³/ha/año) respectivamente.

VALLEJOS. O. 1996. Productivity and relationships of the index of site with fisiographics, edafoclimatic and foliar variable for *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand and *Gmelina arborea* Roxb. in Costa Rica. Thesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica. CATIE. 142 p.

Key words: *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand, *Gmelina arborea* Roxb., index of site, growth, productivity, analysis foliate rehearsal introduction of species.

SUMMARY

Two indirect methods were utilized in order to determine the site quality of site analyzed in this study: the indirect dasometrics method, in order to determine the current state of the plantations, and the indirect environmental method, in order to guide to the plans for reforestation, about the best sites to establish plantations of *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand and *Gmelina arborea* Roxb, in Costa Rica.

The models generated for the estimate of the site index, by means of the indirect dasometrics method, which completed all the assumptions of the squared minimums method, were the following:

Tectona grandis L f , n= 664, [r²]= 0 49

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.8253 \left(\frac{1}{\text{Age}^{0.5162}} - \frac{1}{\text{Base age}^{0.5162}} \right)$$

Bombacopsis quinatum (Jacq) Dugand, n= 306, [r²]= 0 73

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 5.1101 \left(\frac{1}{\text{Age}^{0.2361}} - \frac{1}{\text{Base age}^{0.2361}} \right)$$

Gmelina arborea Roxb, n= 62, [r²]= 0 29

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.5830 \left(\frac{1}{\text{Age}^{0.6533}} - \frac{1}{\text{Base age}^{0.6533}} \right)$$

These models allowed the generation of a classification based upon the site index by the increment in dominant height of trees of 10 years (Figure 1), considering percentiles of the distribution of the index of site (Marginal lower than the 12.5 percentil, Low greater than 12.5 percentil and less than 37.5 percentil, Medium greater than 37.5 percentil and less than 62.5 percentil, High greater than 62.5 percentil and less than 87.5 percentil and Excellent greather than 87.5 percentile)

Figure 1: Classification of the parcels, according to species by five classes of index of site, with base age of 10 years

Class of Site	Species (Bases age 10 years)					
	<i>Tectona grandis</i> L.f.		<i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq) Dugand		<i>Gmelina arborea</i> Roxb	
	IS (m)	IMA Hdom (m/ year)	IS (m)	IMA Hdom (m/ year)	IS (m)	IMA Hdom (m/ year)
Marginal	≤ 13.34	≤ 1.33	≤ 7.79	≤ 0.77	≤ 12.10	≤ 1.21
Low	13.35 - 17.40	1.34 - 1.74	7.80 - 10.91	0.78 - 1.09	12.11 - 20.92	1.22 - 2.09
Medium	17.41- 19.85	1.75 - 1.99	10.92 - 13.00	1.10 - 1.30	20.93 - 22.67	2.10 - 2.27
High	19.86 -22.87	2.00 - 2.28	13.01 - 15.77	1.31 - 1.57	22.68 - 27.79	2.28 - 2.77
Excellent	≥ 22.88	≥ 2.29	≥ 15.78	≥ 1.58	≥ 27.80	≥ 2.78

The growth and productivity of the studied sites, were classified in a similar manner to that for the index of site (Figure 2)

Figure 2: Classification in five classes of growth and productivity, of the analyzed species, according to variable

<i>Tectona grandis</i> L.f						
Variable	Unit	Marginal	Low	Medium	High	Excellent
IMA-Dap	(cm/ year)	≤ 1.97	1.98 - 2.50	2.51 - 3.01	3.02 - 3.59	≥ 3.60
IMA-H	(m/ year)	≤ 1.70	1.71 - 2.35	2.36 - 3.13	3.14 - 3.99	≥ 4.00
IMA-G	(m ² /ha/ year)	≤ 1.14	1.15 - 2.06	2.07 - 2.76	2.77 - 3.57	≥ 3.58
IMA-V1	(m3/ha/ year)	≤ 4.13	4.14 - 11.95	11.96 - 17.80	17.81 - 25.50	≥ 25.51
IMA-V2	(m3/ha/ year)	≤ 9.86	9.87 - 14.14	14.15 - 18.27	18.28 - 24.92	≥ 24.93

<i>Bombacopsis quinatum</i> (Jacq) Dugand						
Variable	Unit	Marginal	Low	Medium	High	Excellent
IMA-Dap	(cm/ year)	≤ 1.16	1.17 - 1.69	1.70 - 2.17	2.18 - 3.05	≥ 3.06
IMA-H	(m/ year)	≤ 0.71	0.72 - 1.01	1.02 - 1.25	1.26 - 1.60	≥ 1.61
IMA-G	(m ² /ha/ year)	≤ 0.16	0.17 - 0.49	0.50 - 1.20	1.21 - 2.21	≥ 2.22
IMA-V1	(m3/ha/ year)	≤ 0.19	0.20 - 0.96	0.97 - 3.75	3.76 - 9.72	≥ 9.73
IMA-V2	(m3/ha/ year)	≤ 4.97	4.98 - 6.83	6.84 - 8.75	8.76 - 15.52	≥ 15.53

<i>Gmelina arboreal</i> Roxb						
Variable	Unit	Marginal	Low	Medium	High	Excellent
IMA-Dap	(cm/ year)	≤ 1.95	1.96 - 2.90	2.91 - 3.60	3.61 - 4.41	≥ 4.42
IMA-H	(m/ year)	≤ 1.40	1.41 - 2.34	2.35 - 3.20	3.21 - 3.70	≥ 3.71
IMA-G	(m ² /ha/ year)	≤ 1.65	1.66 - 2.21	2.22 - 3.33	3.34 - 4.53	≥ 4.54
IMA-V1	(m3/ha/ year)	≤ 8.52	8.53 - 15.73	15.74 - 24.45	24.46 - 37.15	≥ 37.16
IMA-V2	(m3/ha/ year)	≤ 6.25	6.26 - 9.09	9.10 - 12.84	12.85 - 20.53	≥ 20.54

The classification of the sites by site index and the growth and productivity, gave similar outputs for lots those classified as Excellent and Marginal (Figure 3) From the same Figure it is possible to observe that in the same site, lots classified in this manner are found to be radically different, suggesting the high variability of existent microsites in the tropics.

Figure 3 Classification of lots within sites, according to type of lot, classification used and species

		Excellent lots	
Species	Cantón	Index of site	Growth and productivity
		Lots	Lots
<i>T. grandis</i> L. f.	Nandayure	Moravia y Punta Coyote	Moravia y Punta Coyote
<i>B. quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Nicoya	Garza	Garza y Zapote
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Hojancha	Bajo Beneficio, Betania y Pilangosta	Betania

		Marginal lots	
Species	Cantón	Index of site	Growth and productivity
		Lots	Lots
<i>T. grandis</i> L. f.	Bagaces	Bagaces	Bagaces
<i>B. quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Nandayure	Moravia y Punta Coyote	Rio Tabaco
	Nicoya	Garza	
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Santa Cruz	Rio Tabaco	
	Bagaces	La Virgen	
	Cañas	Ganadería Montezuma	

The indirect environmental method that relates the index of site with fisiographics, edafoclimatics and foliar variable, gave the result for *Tectona grandis* L. f. (n= 64) that the variables closely correlated with the site index were: hidric deficit, mean annual temperature, resistance to the penetration and content of calcium between 0-20 cm of depth, for *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand (n= 42) was: the logarithmic slope and the content of calcium between 0-20 cm of depth and for *Gmelina arborea* Roxb. (n= 33) was: the topographical position, the wind and the content of calcium between 0-20 cm of depth. Therefore, the three species are definitely basofilas. For none of the species, the foliar variable presented a significant relationship statistical ($P < 0.05$)

The models that use the variables listed previously, were valid using the procedure developed by Freese (1960) and modified by Vallejos (1979). With the result that only the proposed model for *Gmelina arborea* Roxb., was unbiased and exact. The proposed models are:

Tectona grandis L. f., first depth of the soil, n= 64, [r²]= 0.49, 37% of exactness

$$IS = \frac{25.432112 - 2.695521 \text{ DEFHID} + 0.268667 \text{ Ca}}{0.794}$$

Tectona grandis L. f., first and second depth of the soil, n= 45, [r²]= 0.68, 27% of exactness

$$IS = \frac{118.03081 - 3.989583 \text{ TMA} - 0.340751 \text{ RES} + 0.341109 \text{ Ca}}{0.851}$$

Bombacopsis quinatum (Jacq.) Dugand, first depth of the soil, n= 42, [r²]= 0.34, 27% of exactness

$$IS = \frac{9.942913 - 1.531195 \text{ Log (PEND)} + 0.264734 \text{ Ca}}{0.897}$$

Gmelina arborea Roxb., first depth of the soil, n= 33, [r²]= 0.59, 13% of exactness

$$IS = 15.509609 + 2.084607 \text{ PTO} - 2.334711 \text{ VIENTO} + 0.188707 \text{ Ca}$$

The content of foliar nutrient was related to the nutrients of the soil and variable edaphics, for *Tectona grandis* L. f., the result was that the content of calcium in the soil (0-20 cm of depth), was found to be highly correlated (P< 0.01) with the content of calcium foliar ([r²]= 0.91) and magnesium foliar ([r²]= 0.92). In both cases, the relationship is positive, which confirms that this species is basófila, for upon increasing the content of calcium in the soil, the content foliar of calcium and magnesium increases. For *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand, no such similar relationship occurred as that for *Tectona grandis* L. f., for calcium and magnesium. This is probably due to the fact an extreme site which allows clear relations between the variables to be observed. However, the content of potassium in the soil, was found to be highly related (P< 0.01) with the content of potassium foliate ([r²]= 0.63).

Finally by means of the statistical analysis of the rehearsal of sources been located in Barra Honda, province of Guanacaste, Costa Rica, the most promising areas for the development of reforestation programs of the area in the Cantón of Nicoya they resulted be: the Puntarenas source and the Quepos source, both in Costa Rica, with an medium annual Increment diameter of 2.76 2.48 (cm/ year), an medium annual Increment height of 1.96 1.79 (m/ year) and an medium annual Increment total volume of 12.42 11.41 (m³/ha/ year) respectively.

1. INTRODUCCION

Extensas áreas de bosques tropicales, han sido deforestadas y transformadas a usos agropecuarios, debido a la presión social para satisfacer necesidades básicas de alimentación. En Costa Rica, se presenta un proceso vertiginoso, pues la tasa de deforestación es de aproximadamente 50.000 hectáreas anuales, muchas de las cuales no tenían potencial para la agricultura y al no rendir la producción esperada han sido abandonadas por sus propietarios.

Previendo las funestas consecuencias que estas acciones ocasionan al país, el gobierno de Costa Rica, a partir de 1978, inicia un plan de reforestación nacional, creando incentivos fiscales para promover el establecimiento de plantaciones. Desafortunadamente, este plan no causó el impacto previsto, ya que por desconocimiento o por el interés único de los incentivos económicos, en algunos casos se reforestaron áreas sin una buena planificación de selección de sitios y de especies aptas, con la correspondiente pérdida de dinero para las arcas fiscales y el fracaso de proyectos de reforestación.

De este modo, la determinación de la calidad y la capacidad productiva potencial de los sitios, se torna central en el proceso de planificación de la reforestación nacional, para evitar fracasos técnicos y la consiguiente pérdida económica para el país y de los particulares o empresas privadas que reforestaron con o sin incentivos del gobierno

Por lo tanto, el interés se centra tanto en determinar la calidad de sitios, donde ya se han desarrollado programas de reforestación (para conocer el estado actual de las plantaciones), como en nuevas áreas potenciales para la reforestación, orientando de esta manera sobre las áreas donde se puedan establecer plantaciones de *Tectona grandis* L. F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb.

En los últimos años 10 años, en Costa Rica, se han establecido proyectos de reforestación con estas tres especies, consideradas de gran importancia por los reforestadores; sin embargo, se carece de estudios que evalúen el crecimiento de estas

especies en diferentes regiones climáticas del país, ya que los estudios desarrollados han sido muy puntuales.

El estudio planteado en esta investigación sobre productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edáficas, foliares y climáticas para *Tectona grandis* L. F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb., se espera que contribuya a mejorar el conocimiento y servir de guía a técnicos forestales, propietarios e inversionistas que deseen iniciar programas de reforestación con estas especies en Costa Rica y para otras regiones tropicales con condiciones similares a los sitios estudiados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Determinar calidades de sitio para plantaciones establecidas de *Tectona grandis* L. F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica, utilizando el método indirecto dasométrico y evaluar el método indirecto ambiental para determinar las variables más estrechamente relacionadas con el crecimiento de dichas plantaciones. Así mismo, analizar el contenido nutricional de los suelos y el follaje en diferentes condiciones ecológicas donde crecen estas especies.

2.2. Objetivos específicos:

- Determinar las variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares que estén más estrechamente relacionadas con el índice de sitio, basado en la altura dominante de los árboles.
- Determinar y clasificar el crecimiento y la productividad, para las especies en estudio.
- Validar los modelos predictivos de índice de sitio para las tres especies en estudio, a través del procedimiento desarrollado por Freese, (1960) y modificado por Vallejos, (1979)
- Determinar relaciones entre el contenido nutricional del suelo y del follaje, para las tres especies estudiadas.
- Seleccionar la mejor procedencia de *Tectona grandis* L. f., del ensayo montado en Barra Honda, cantón de Nicoya, provincia de Guanacaste, Costa Rica.

3. HIPOTESIS DE TRABAJO:

- Existe independencia entre las variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares y el índice de sitio; es decir, estas variables no explican de manera significativa las variaciones en el índice de sitio, para las tres especies estudiadas.
- Los modelos predictivos de índice de sitio, no representan fielmente la variación del índice de sitio en cualquier área de la zona de estudio.
- No existen diferencias significativas, en cuanto a la productividad, para las clases de sitios definidos en el estudio, para cada una de las especies en análisis.
- No existen relaciones significativas entre el contenido nutricional del suelo y del follaje de los árboles, para las tres especies en estudio.
- No se presentan diferencias estadísticamente significativas entre la procedencias evaluadas de *Tectona grandis* L. F., del ensayo montado en Barra Honda, cantón de Nicoya, provincia de Guanacaste, Costa Rica.

4. REVISION DE LITERATURA

4.1. Descripción y requerimientos de las especies consideradas en este estudio

A continuación se hará una breve descripción de *Tectona grandis* L. F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en relación con el crecimiento y su relación con características de sitio.

4.1.1. *Tectona grandis* L. F.

Es originaria de Birmania, Tailandia y algunas partes de la India (entre la latitud 25° a 12° N y la longitud 104° a 73° E), pertenece a la familia Verbenaceae, su fuste es recto y presenta generalmente dominancia apical. La especie es marcadamente heliófita y muy susceptible a la competencia interespecífica en su fase inicial de crecimiento (Lamprecht, 1990)

Según Lamprecht (1990), en su distribución natural la especie requiere una estación seca definida, de tres a siete meses, con una precipitación media anual entre 760 y 5000 mm, con temperaturas medias que oscilen entre 21 y 28° C y altitudes hasta los 1300 msnm. El estudio desarrollado por (Vásquez y Ugalde, 1995), demostró que los mejores crecimientos de esta especie en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, estaban asociados a un aumento de la precipitación media anual

Esta especie, en su distribución natural se desarrolla en diversos tipos de suelos, pero alcanza un mayor desarrollo en suelos franco-arenosos o arcillosos, fértiles, bien drenados, profundos y con pH ligeramente ácidos o neutros (Lamprecht, 1990) Vásquez y Ugalde (1995), reportan que en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, la especie crece bien en fondos de valles o pie de monte, con suelos profundos (superiores a 90 cm), sin problemas de compactación y con contenidos de calcio

superiores a 10 cmol(+)/L. Esta especie requiere altos contenidos de calcio para su desarrollo¹, confirmando su condición de especie basófila.

La especie presenta limitaciones en suelos poco profundos compactados y arcillosos, con bajo contenido de calcio y magnesio, con pendiente excesiva y mal drenaje. En el estudio desarrollado por Vásquez y Ugalde (1995), señalan que los peores sitios en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, se ubicaron en suelos con menos de 90 cm de profundidad, con un contenido de calcio inferior a 10 cmol(+)/L, ubicados por lo general en cimas y áreas sobrepastoreadas

4.1.2. *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand

Distribuida naturalmente desde Honduras hasta Venezuela, pertenece a la familia Bombacaceae, es monoica y decidua, su fuste puede alcanzar hasta 30 m y con diámetros superiores a 100 cm

Esta especie, en su distribución natural requiere una estación seca definida, de tres a cinco meses, con temperaturas medias que varíen entre 20 y 27° C, con precipitaciones promedios anuales entre 800 y 2200 mm, y altitudes no superiores a 900 msnm (CATIE, 1991)

Los sitios planos, de textura franca a franca arcillosa, profundos y con buen drenaje es donde alcanza un mejor desarrollo Navarro (1987), para Costa Rica determinó que un aumento del porcentaje de arcillas influía negativamente sobre el índice de sitio, en tanto Vásquez y Ugalde (1995), indican que los mejores sitios en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, se ubican en fondo de valles, protegidos del viento, con contenidos calcio y magnesio superiores a 15 y 9 cmol(+)/L respectivamente, en el primer horizonte.

¹ ALVARADO A. 1996 Requerimientos de *Tectona grandis* L. F. CIA, San José, Costa Rica. Comunicación personal

La literatura reporta entre los factores limitantes al desarrollo de la especie, los suelos poco profundos, de baja fertilidad natural, compactados, con pendientes pronunciadas y excesiva humedad.

4.1.3. *Gmelina arborea* Roxb.

Originaria del sureste asiático (entre la latitud 32° a 8° N y 112° a 70° E), pertenece a la familia Verbenaceae, su fuste es recto y puede alcanzar hasta 30 m y diámetros máximos entre 60 y 100 cm. Especie al igual que *Tectona grandis* L. f., notoriamente heliófita (Lamprecht, 1990)

La especie en su distribución natural, se adapta a diversas zonas de vida (bosque seco tropical, bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical, según la clasificación de Holdridge, 1987), pero se desarrolla mejor en sitios con una precipitación media anual entre 1750 a 2300 mm, una estación seca definida, de tres a cinco meses, una temperatura promedio que varíe entre 18 y 35° C (Lamprecht, 1990). No obstante, para la empresa STON Forestal en la zona sur de Costa Rica, los mejores sitios deben presentar una precipitación media anual entre 3800 a 5000 mm (Zeaser, 1995).

Los rendimientos más satisfactorios se han logrado en suelos con adecuada disponibilidad de humedad, profundos, bien drenados, con una buena fertilidad natural, y pH ligeramente ácidos a básicos. Vásquez y Ugalde (1995), determinaron que esta especie se desarrolla mejor en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, en fondos planos o pendientes inferiores, donde habitualmente se presenta mayor disponibilidad de agua y nutrientes, con contenidos de calcio y magnesio superiores de 10 y 6 cmol(+)/L respectivamente, en el primer horizonte

La especie tiene limitaciones en suelos muy erosionados, compactados en topografía quebrada y donde se presenta gran competencia con malezas, sobretodo con gramíneas. Vásquez y Ugalde (1995), señalan que en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, los sitios muy ventosos presentaron bajos índices de sitio.

4.2. Calidad de sitio e Índice de sitio

Alfaro (1983), hizo una recopilación de las diferentes definiciones expresadas en la literatura, las cuales son señaladas a continuación y que coinciden con las presentadas por Daniel *et al* (1982); y Vásquez y Ugalde (1995):

- Se entiende por *sitio* a "un área considerada en términos de sus factores, con referencia a la capacidad de producir bosques u otra vegetación; lo que es la combinación de las condiciones bióticas, climáticas y edáficas de un área". Es decir, al complejo de factores bióticos y abióticos.
- Se entiende por *calidad de sitio* a "la combinación e interacción de los factores bióticos y abióticos con la vegetación existente" En el caso forestal, dicha calidad se estima como la máxima cosecha de madera o biomasa que el bosque produce en un tiempo determinado, es decir la productividad de dicho bosque
- Se entiende por *índice de sitio* a "la estimación de la altura dominante (Hdom) que los árboles dominantes (100 árboles más altos por hectárea) de una plantación coetánea alcanzan a una edad en particular, conocida como edad base". El índice de sitio es la expresión de la calidad de sitio, basada en la Hdom.

4.3. Métodos de evaluación de calidad de sitio

Según Daniel *et al.* (1982), los métodos de evaluación de calidad de sitio, se dividen en métodos directos e indirectos.

4.3.1. Método directo

El método directo, que presenta un mayor costo, se basa en la medición de la masa existente y en el desarrollo de tablas de rendimiento normal, para rodales con un monitoreo continuo de su desarrollo y crecimiento. Este método ha sido aplicado en

países con una larga trayectoria forestal, donde la información requerida ha sido recabada en múltiples rotaciones

4.3.2. Método indirecto

Los métodos indirectos, usados de manera habitual según Grenn, Marshall y Klinka (1989), son aplicables a países con un avanzado desarrollo forestal, ya que son menos onerosos al no estimar directamente el volumen, sino una variable de más fácil medición y estrechamente correlacionada con él; dicha variable es la Hdom que según Monserud, Moody y Breuer (1990), sería capaz de predecir la cantidad de madera a producir en un sitio en particular, con mayor exactitud que cualquier otra variable a ser considerada, ya que la Hdom es menos influenciada por la densidad de rodal, que cualquier otro parámetro de rodal (Daniel *et al*, 1982; Carter y klinka, 1990; Monserud, Moody y Breuer, 1990; Vásquez, 1995) Sin embargo, la Hdom en situaciones extremas de densidad de rodal, se ha visto afectada (McLeod y Running, 1988), y no estaría expresando la productividad del sitio, sino más bien sería una respuesta a la competencia de sus vecinos (Galloway, Alomoto y Maldonado, 1991)

Los métodos indirectos pueden ser diferenciados en tres: índice de sitio dasométrico, índice de sitio vegetacional e índice de sitio ambiental

Al pretender orientar los programas de reforestación de un país, identificando los sitios más productivos antes de realizar una plantación, tanto el índice desarrollado a partir de la vegetación como el ambiental, aparentemente son los más indicados ya que permiten evaluar un sitio, sin que la masa boscosa se encuentre presente, a diferencia de lo que ocurre con el índice de sitio dasométrico

4.3.2.1. Índice de sitio dasométrico

Para la construcción del índice de sitio dasométrico, es necesario medir tanto la altura como la edad de árboles presentes en los rodales a ser evaluados. Según Williams, Hoffman y Seymour (1991), esta información puede tener dos orígenes: a) parcelas temporales y/o permanentes y b) Análisis fustal

Para algunos autores el índice de sitio real, se obtiene al realizar un análisis fustal (Jones, 1969, citado por Mcleod y Running, 1990), sin embargo, la determinación del índice de sitio sin utilizar un método destructivo, es decir, solo registrar la altura y a través de registros determinar la edad, es una práctica aceptada en la actividad forestal.

4.3.2.2. Índice de sitio vegetacional

El método consiste en asociarle un índice de sitio a un área definida, donde se presenta predominancia de una cierta especie, la cual es considerada "indicadora" de la calidad del sitio. Este método fue desarrollado por Cajander (1926), citado por Daniel *et al* (1982), siendo utilizado en varios países, entre ellos Finlandia y ha presentado resultados medianamente satisfactorios en países templados - fríos, donde la diversidad ecológica es menor. En el trópico, donde se presenta una gran diversidad ecológica, este método no ha dado buenos resultados (Daniel *et al*, 1982). Sin embargo, es posible encontrar zonas de menor diversidad ecológica en el trópico, sobretodo en sitios secos o muy elevados, donde el uso de especies indicadoras tal como *Crescentia alata* H B K. ha dado buenos resultados²

4.3.2.3. Índice de sitio ambiental

El índice de sitio ambiental o índices de sitios edafoclimáticos, relacionan el índice de sitio (en áreas donde existe vegetación) con variables edafoclimáticas; de este modo, al determinar las variables edafoclimáticas relacionadas con el índice de sitio, de un área desprovista de árboles de interés, será posible estimar la calidad del sitio en estudio (Mogren y Dolph, 1972; Hagglund, 1981, citado por Vásquez, 1995).

La interacción de factores ambientales, provoca una multiplicidad de calidades de sitio, lo que en la mayoría de los casos, puede enmascarar la influencia de algún factor al analizar algunos de ellos (Mcleod Y Running, 1988), es decir, es relativamente fácil listar de manera individual los factores de sitio, pero más difícil evaluar con precisión el efecto integrado de ellos (De Las Salas, 1984; Monserud, Moody y Breuer, 1990), ya

² GALLOWAY, G 1996. Uso de especies indicadoras CATIE, Turrialba, Costa Rica
Comunicación personal

que diferentes combinaciones de factores individuales, pueden tener el mismo efecto sobre el desarrollo de las plantas debido a efectos compensatorios (Pfister, 1984, citado por Grenn, Marshall y Klinka, 1989; Klinka y Carter, 1990).

Frecuentemente los factores edafoclimáticos explican entre un 50 y 60% de la variación total del índice de sitio, (Covel y Mc Clurkin, 1967, citados por Daniel *et al*, 1982; Alfaro, 1983; Rayner, 1991). En casos específicos, cuando alguna variable edáfica es la principal limitante, por ejemplo, suelos mal drenados, esta variable podría explicar hasta el 100% del total de variación del índice de sitio.

En la mayoría de los casos el porcentaje explicado por la variables independientes es estadísticamente significativo, lo cual incentiva para desarrollar nuevos modelos que presenten mejores ajustes; sin embargo, este deseo no debe anteponerse a la simplicidad (pocas variables) y facilidad de utilización del modelo (Alder, 1980; Turner, 1981, citado por Vásquez, 1995), ya que con esto se reduce la colinealidad y aumenta la aplicabilidad del modelo.

En muchos casos (Cuadro 1), se ha producido el abuso de técnicas de selección de variables (proceso Stepwise), lo que origina complicados modelos predictivos, presentándose probablemente una alta colinealidad entre las variables predictivas. La aplicación correcta de esta técnica, requiere que el investigador, utilice su experiencia silvícola y conocimiento estadístico para sopesar los resultados obtenidos en cada situación, siendo preferible la proposición de modelos menos precisos, pero de mayor aplicabilidad.

También se indica que la estimación de la calidad de sitio será más precisa, si los rodales son jóvenes, ya que la vegetación presente en el sitio modificaría principalmente las propiedades edáficas de un sitio (Alfaro, 1983 y Vásquez, 1995).

Los factores fisiográficos han sido utilizados, a fin de predecir la calidad de sitio, esto se debe a que la topografía es uno de los factores que influyen en la formación del suelo, por lo tanto es una fuente de variabilidad importante a ser considerada (Jenny, 1941,

citado por Hairston y Grigal, 1991) Comúnmente estos factores se incorporan en estudios de gran escala, donde se presentan variaciones fisiográficas de importancia

De las Salas (1984) y Hairston y Grigal (1991), coinciden en señalar que las ventajas de utilizar información topográfica es evidente, ya que dicha información puede ser fácilmente observada ya sea en terreno o en material cartográfico.

Además la topografía influye sobre varios factores ambientales, afectando el crecimiento de los árboles, por lo tanto la posición topográfica debería ser usada como un indicador de éstos factores (Carmean, 1975, citado por Hairston y Grigal, 1991) particularmente en latitudes extremas o regiones nubosas; no obstante la relación entre sitio y condiciones fisiográficas, no debe ser considerada como una relación causa y efecto, ya que las condiciones topográficas y climáticas influyen indirectamente sobre condiciones que favorecen el crecimiento de los árboles (Ortega, 1986; Schmidt y Carmean, 1988)

Schmidt y Carmean (1988), señalan que para poder relacionar la topografía y condiciones climáticas con la calidad de sitio, es necesario que éstas varíen ampliamente en el área de estudio; y los resultados que se obtengan serán válidos solamente para las condiciones en que el estudio fue realizado (Fassbender y Tschinkel, 1974).

Según Hairston y Grigal (1991), la simple identificación de la posición topográfica, no reemplaza la necesidad de mediciones más detalladas de las propiedades del suelo. Esto es posible comprobarlo con la información presentada por Vásquez (1987) (Cuadro 1) en donde al incorporar variables edáficas el coeficiente de determinación del modelo se incrementó desde un 40% a un 94%. Este efecto es normal puesto que además del relieve, en la formación del suelo intervienen el material parental, el clima, los organismos y el tiempo. Pese a obtener coeficientes de determinación tal altos, no debe olvidarse lo señalado con anterioridad a cerca de la simplicidad y aplicabilidad de los modelos propuestos.

Tanto la exposición como la posición sobre la pendiente de las parcelas están relacionados con el índice de sitio. Por ejemplo en el hemisferio norte, la exposición noroeste con pendientes bajas ha sido tradicionalmente considerada óptima para el desarrollo forestal (Verbyla y Fisher, 1989). Esto fue comprobado por Hairston y Grigal (1991), al realizar un estudio en rodales de *Quercus ellipsoidalis* en Minnesota USA, donde al analizar el contenido de humedad en el suelo comprobó una mayor disponibilidad de esta, en pendientes bajas y exposición Noroeste.

Esto confirma lo expresado por Kozlowski (1982), citado por Mcleond y Running (1988), quien señala que la disponibilidad de agua, es el factor más referido en la literatura (sobretudo en zonas con épocas secas prolongadas) y que posee un efecto predominante sobre la productividad forestal. Sin embargo, Verbyla y Fisher (1989), expresan que la exposición óptima para el desarrollo forestal, podría variar con la elevación y la estación de crecimiento.

También se han obtenido buenos ajustes entre variables climáticas y el índice de sitio, en áreas donde dichas variables presentan fluctuaciones. Esto es ratificado por Lockaby y Caulfield (1989), quienes señalan que la variación de productividad forestal, puede ser atribuida a diferentes patrones climáticos, donde la precipitación, temperatura y largo del período de crecimiento, tienen un rol preponderante.

Otras variables, un tanto más tediosas y onerosas de obtener, son las propiedades físicas y químicas de los suelos, las cuales en la mayoría de los casos presentan buenos ajustes con el índice de sitio, presentando coeficiente de determinación altamente significativos (De Las Salas, 1984). Además, se presenta una relación causa efecto de estas variables, con el crecimiento de los árboles, lo cual posibilita el desarrollo de estos modelos sobre una base lógica de análisis.

Sin embargo, los resultados de estudios de índice de sitio relacionados con variables edáficas son variados, por ejemplo Johnson *et al* (1987), indica que los modelos basados en variables químicas del suelo han tenido una merma en su utilización, debido a complejas interacciones entre formas orgánicas no disponibles y formas minerales disponibles y la dificultad inherente de muestreo.

También Schonau (1987), citado por Rayner (1991), señala que el uso de variables edáficas para determinar la calidad del sitio, ha declinado al no poder distinguir parámetros claros que expliquen el crecimiento de los árboles. Esto fue comprobado por Grey (1989), quien al trabajar con *Pinus radiata*, en Sudáfrica, obtuvo un mal ajuste al relacionar el índice de sitio con variables morfológicas y químicas del suelo. También Rayner (1991), no pudo relacionar el índice de sitio de *Eucalyptus diversicolor* F. Muell. con variables químicas.

No obstante, en otros estudios si se han obtenido resultados satisfactorios al incorporar solo las propiedades químicas del suelo, o al ser combinadas con otros factores relacionados (Fassbender y Tschinkel, 1974; Alfaro, 1983; Schlatter, 1987; Johnson, *et al.*, 1987; Schmidt y Carmean, 1988; Courtin, *et al.*, 1988; Carter y Klinka, 1990; Pacheco, 1991; Galloway, Alomoto y Maldonado, 1991). Un resultado satisfactorio o no satisfactorio estadísticamente significa probablemente que en el primer caso los suelos eran más determinantes en el crecimiento de las especies que en el último caso.

Con el objeto de reseñar la principal orientación de los estudios realizados sobre el tema, se incorpora una descripción resumida (Cuadro 1), a fin de mostrar la gran variabilidad existente entre modelos y resultados obtenidos.

Cuadro 1: Listado de investigaciones que han presentado ajustes estadísticos satisfactorios, relacionando variables fisiográficas y/o climáticas y/o edáficas con el índice de sitio

Autor	Año	Especie	Lugar	Variables fisiográficas y/o climáticas y/o edáficas	n	r ²
Fassbender y Tschinkel	1974	<i>Cupressus lusitánica</i> (MILL)	Antioquia, Colombia	pendiente (+), convexidad (-) o concavidad topográfica (+), Ca (+), K (+) y Mg (+)	57	40 a 72
Farr y Harris	1979	<i>Picea sitchensis</i> (Bong.)	Costa pacífica de USA	latitud (-) y el número de días con una temperatura superior a 5 °C (-)	25	99
Girardo, Del Valle y Escobar	1980	<i>Cordia alliodora</i> Ruiz & Pavon	Antioquia, Colombia	CIC (+) y pH (+)	13	75
Alfaro	1983	<i>Cupressus lusitánica</i> (MILL)	Valle Central Costa Rica	logaritmo del % de limo (-), el % de poros del suelo (-), el % de arcilla (+) y el % de agua disponible (+) 25 cm profundidad K (-), P (+), N (-) y la relación C/N. (-) a 50 cm profundidad altitud (+)	24	61
Ortega	1986	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Turrialba, Costa Rica		24	47
Johnson, et al	1987	<i>Acer rubrum</i>	Wisconsin y Michigan, USA	Presencia de arcilla (+), profundidad del moteado (-), % arcilla (-), profundidad total de las raíces (-), espesor del horizonte B (+) y color del horizonte A (-)	30	28
Kabzems y Klinka	1987	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Vancouver Canadá	N (+), Ca (+) y Mg (+)	16	78 a 93
Navarro	1987	<i>B. quinatum</i> (Jacq.) Dugand	Costa Rica	Precipitación media anual (+), Número de meses secos (+), pendiente (-) % arcilla (-) y número de meses secos (+)	14	60 a 67
Schlatter	1987	<i>Pinus radiata</i> (D. Don)	Chile	latitud (+), precipitación media anual (+), densidad aparente (-), % de arena (-) capacidad de agua aprovechable (+), volumen poros (+), profundidad horizonte A (+), C (+), N (+), limo (+) y arcilla (+)	42	41 a 64
Vásquez	1987	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Reserva Forestal La Yeguada, Panama	posición topográfica (+), drenaje interno (+), acidez hasta 5 cm (+), Mn hasta 5 cm (+), Z hasta 5 cm (-), Cu hasta 5 cm (+) y porcentaje de limo de 30 a 50 cm (-)	38	41 a 94
Schmidl y Carmean	1988	<i>Pinus banksiana</i> Lamb.	norte de Ontario, USA	Profundidad total (-), profundidad efectiva (+), espesor horizonte A (+), % cuarzo horizonte A (-), % cuarzo horizonte C (-), % arcilla horizonte A (-), pendiente (-), pH horizonte B y C (-)	18 a 31	65 a 83
Courtin et al	1988	Diversas especies	Columbia Británica, USA	pH (+), C/N (-), N total (-) y Ca+Mg+K intercambiable (+)	195	47
Campos	1989	<i>E. carmauldensis</i> <i>L. leucocephala</i> <i>G. sepium</i>	América Central	Altitud (-), erosión (-), lluvia (-), Mo (-) y Ca/Mg (+) Altitud (-), uso de la tierra (+), P (-), Zn (+) y Cu (-) Altitud (-), # meses pp < 80 mm (-), Ca (-), pH (+) y Mn (+)	177 166 153	63 59 64

Continuación ...

Cuadro 1: Listado de investigaciones que han presentado ajustes estadísticos satisfactorios, relacionando variables fisiográficas y/o climáticas y/o edáficas con el índice de sitio

Autor	Año	Especie	Lugar	Variables fisiográficas y/o climáticas y/o edáficas	n	r ²
McNab	1989	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	Apalaches, USA	índice de forma de terreno (+)	90	51
Radwan, Murray y Kraft	1989	<i>Abies amabilis</i> (Dougl.) Forbes	Washington, USA	elevación (-)	19	59
Carter y Klinka	1990	<i>Pseudotsuga menziesii</i> [Mirb] Franco	Columbia Británica, USA	déficit de agua (-), logaritmo natural del N mineralizable (+), N mineralizable del piso forestal (+)	53	47 a 67
Monserud, Moody y Breuer	1990	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>glauca</i>	norte de Idaho y noroeste de Montana, USA	elevación (-), precipitación(+), latitud (-) y longitud (+)	133	38
Pacheco	1991	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	Portugal	promedio de temperaturas mínimas de otoño (+), K (+), porosidad total (+) y contenido de arenas finas (-)	65	54
Galloway, Albmoto y Maldonado	1991	<i>Prosopis juliflora</i> y <i>Schizolobium parahybum</i> (Vell.)	zona costera de Ecuador	precipitación/1000 (+) y P del horizonte A (+)	22	58 a 68
Zeaser, Murillo	1992	<i>G. arborea</i>	Costa Rica	Incremento en Hdom relacionado con pH (-), Fe (-), CICE (+) y Ca/Mg (+)	21	0.81
Sánchez	1994	<i>E. deglupta</i> <i>E. grandis</i>	Turrialba Costa Rica	Mg (+), P(+), Arcilla (-) Ca (+), Mn (-)	37 57	76 48
Zech	1994	<i>Gmelina arborea</i>	zona norte Costa Rica	distancia a la cima (+), grosor del horizonte Ah (+), densidad del horizonte Ah(-), uso anterior (+)	21	86
Vásquez y Ugalde	1994	<i>G. arborea</i> <i>T. grandis</i> <i>B. quinatum</i>	Guanacaste Costa Rica	posición topográfica (+), viento (-) y Ca primer horizonte (+) precipitación media anual (+) y Ca primer horizonte (+) viento (-) y Mg primer horizonte (+)	37 23 35	56 45 55
Herrera	1996	<i>Vochysia ferruginea</i>	San Carlos Costa Rica	P (-), Mn (+), Mo (-), Arcilla (-) de 0-12 cm profundidad	24	80
Chavarria	1996	<i>Eucalyptus deglupta</i> Blume	Huetar Norte Costa Rica	Mg (+), Arcilla (-)	50	41

(+) Relación positiva (-) Relación negativa

Los principales factores edáficos que afectan el crecimiento de las plantas, algunos de los cuales han sido descritos en el Cuadro 1, serán sintetizados a continuación:

Textura: La textura representa la proporción relativa de los contenidos de arcilla, limo y arena del suelo (Daniel *et al.*, 1982). Esta propiedad, no tiene una influencia directa sobre el crecimiento de las plantas, sino que influye sobre otras propiedades del suelo, tales como: el grado de aireación del suelo, el suministro de agua, la consistencia del mismo y la infiltración (Gavande, 1972; Baver, Gardner y Gardner, 1973; Alfaro, 1983).

Se han desarrollado modelos que correlacionan la textura, por sí sola o , combinada con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Alfaro (1983), Schlatter (1987), Johnson, *et al.* (1987), Navarro (1987), Schmidt y Carmean (1988), Pacheco (1991) y Chavarría (1996), realizaron investigaciones (Cuadro 1) en este aspecto, obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Estructura: La estructura de un suelo, está referida al tipo y agregación de las partículas del suelo (Daniel, *et al.* 1982), la cual según Donoso (1981), es el factor más importante en el crecimiento de los árboles, ya que influye sobre las relaciones hídricas y la aireación del suelo. Además, el crecimiento radicular de los árboles, es afectado por el tamaño de los agregados y su desarrollo estructural (Gavande, 1972; Baver, Gardner y Gardner, 1973; Alfaro, 1983).

En la literatura revisada, no se encontraron modelos que correlacionen la estructura con el índice de sitio.

Profundidad: La profundidad del suelo reviste gran importancia en el crecimiento vegetal, puesto que un incremento en la profundidad, habitualmente se ve asociado a una mayor cantidad de nutrientes, mayor capacidad de disponibilidad de agua, mayor espacio radicular y menor susceptibilidad a daños por viento (Daniel, *et al.* 1982; Alfaro, 1983).

Se han desarrollado modelos que correlacionan la profundidad, combinada con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Schlatter (1987), Johnson, *et al.* (1987), Schmidt y Carmean (1988) realizaron investigaciones al respecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Materia Orgánica: Se entiende por materia orgánica a la " fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo" (Soil Society of America s.f.; citado por Fassbender y Bornemisza, 1987).

La materia orgánica, en la mayoría de los casos tiene un efecto benéfico tanto sobre las propiedades físicas como químicas del suelo, repercutiendo sobre el crecimiento de los árboles (Alfaro, 1983), ya que es una importante fuente de nitrógeno. Sin embargo, al presentarse un contenido excesivo de materia orgánica, la cual no se degrada fácilmente, las relaciones con el índice de sitio son negativas (Coile, 1935; Dellabianca y Olson 1961, ambos estudios citados por Alfaro, 1983; Campos, 1989; Herrera, 1996).

Acidez del suelo: El pH por sí mismo no influye sobre las plantas en el aspecto biológico, si no que influye sobre la disponibilidad o fijación de algunos nutrimentos requeridos por la planta (Alfaro, 1983). La mayoría de las plantas, en suelos extremadamente ácidos, presentan bajos rendimientos al presentarse toxicidad de elementos (Al, Mn) y deficiencia de nutrientes (Ca, Mg y Mo) (Sánchez, 1981). La excepción podría estar dada por especies del género *Pinus* y *Vochysia*, las cuales tienen la capacidad de adaptarse y crecer en suelos ácidos.

Se han desarrollado modelos que correlacionan el pH, combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Giraldo, Del Valle y

Escobar (1980), Schmidt y Carmean (1988), Courtin *et al.* (1988) y Campos (1989) realizaron investigaciones en este aspecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Nitrógeno: Este elemento se encuentra en compuestos esenciales para la planta, como son las proteínas, los ácidos nucleicos y las vitaminas y por lo general se presentan deficiencias de este nutriente en los suelos forestales (Alfaro, 1983). Normalmente la temperatura del suelo, afecta inversamente la disponibilidad de este elemento, es decir a una mayor temperatura menor será la disponibilidad de N, por tener tasas de descomposición más rápidas de materia orgánica, aunque al practicar un raleo en sitios con mucha acumulación de materia orgánica, se presentará una mayor disponibilidad de N para los árboles remanentes. La lluvia en tanto, influye proporcionalmente la disponibilidad de este elemento, es decir a mayor intensidad de lluvias, mayor contenido de N, aunque en situaciones extremas de pluviosidad se presenta la lixiviación de este elemento.

Se han desarrollado modelos que correlacionan el N, combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Alfaro (1983), Kabzems y Klinka (1987), Schlatter (1987), Courtin *et al.* (1988), Carter y Klinka (1990), realizaron investigaciones al respecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Calcio: Su principal papel es estructural, ya que conforma elementos cementantes de la pared celular. Participa en el desarrollo de membranas celulares y de estructuras lipídicas. Actúa como activador de enzimas y se relaciona con la nodulación y la fijación de N (Bertsch, 1995).

Se han desarrollado modelos que correlacionan el contenido de calcio combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Kabzems y Klinka (1987), Courtin *et al.* (1988), Campos (1989) y

Vásquez y Ugalde (1994), realizaron investigaciones al respecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Magnesio: Este elemento es determinante sobre la fotosíntesis, ya que forma parte de la molécula de clorofila. Es un activador enzimático, especialmente en reacciones de fosforilación del ATP en el metabolismo de los azúcares y en la síntesis de ácidos nucleicos (Bertsch, 1995)

Se han desarrollado modelos que correlacionan el contenido de magnesio combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Fassbender y Tschinkel (1974), Kabzems y Klínka (1987), Courtin *et al.* (1988), campos (1989), Vásquez y Ugalde (1994) y Chavarría (1996), realizaron investigaciones al respecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Potasio: El potasio, regula la apertura y cierre de los estomas, activa una cantidad considerable de enzimas y participa en la síntesis de muchos almidones y proteínas. Este elemento es bastante móvil en las plantas y con relativa facilidad puede ser lixiviado de las hojas de los árboles (Donoso, 1981).

Se han desarrollado modelos que correlacionan el contenido de potasio, combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Fassbender y Tschinkel (1974), Alfaro (1983), Courtin *et al.* (1988) y Pacheco (1991) realizaron investigaciones al respecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

Fósforo: El fósforo es el responsable del transporte de energía, presentándose en los núcleos de las células de las plantas, por lo tanto, la división celular y el crecimiento y todos los procesos energéticos, dependen de niveles adecuados de este elemento (Baver, Gardner y Gardner, 1973). El fósforo insoluble, el cual es liberado por meteorización, rápidamente es inmovilizado por iones de aluminio, fierro en suelos ácidos y por iones de calcio en suelos básicos.

Se han desarrollado modelos que correlacionan el contenido de fósforo, combinado con otras propiedades del suelo, con el índice de sitio. Alfaro (1983), Campos (1989), Galloway, Alomoto y Maldonado (1991) y Herrera (1996) realizaron investigaciones en este aspecto (Cuadro 1), obteniendo en cada caso modelos estadísticamente satisfactorios.

4.4. Análisis foliar

Según Bertsch (1995), es posible utilizar el análisis foliar como una "técnica de diagnóstico del estado nutricional de las plantas", ya que es en las hojas donde se realiza la síntesis de las sustancias esenciales para el crecimiento y la fructificación y por ende, debiera representar de mejor manera el estado nutricional que los demás órganos.

Se han establecido relaciones entre el contenido nutricional de las hojas y el índice de sitio, este es el caso de la investigación desarrollada por Bockheim, Leide y Frelich (1989), quienes establecieron que el índice de sitio de *Pinus resinosa* Ait. creciendo en Wisconsin, se relacionaba con el contenido de nitrógeno foliar ($r = 0.86$) y con el contenido de Ca foliar ($r = 0.58$).

También se ha relacionado el contenido nutricional foliar, con el resultante de muestreo de suelos, intentando comprender el ciclaje de nutrientes (Drechsel y Zech, 1991). Herrera (1996), determinó que el contenido de zinc foliar estaba estrechamente correlacionado (r superiores a 0.9) con el contenido en el suelo de calcio y magnesio, argumentando el autor que debido al medio - alto pH del suelo, se presenta mayor disponibilidad tanto en el suelo como en la planta de zinc, como asimismo de bases en el suelo.

La interpretación de los resultados de este tipo de análisis, presenta limitaciones, ya que en la mayoría de los casos no se dispone de niveles críticos de nutrimentos, tanto foliar como en el suelo, para las especies arbóreas tropicales, ya que la investigación forestal en este ámbito, se ha centrado principalmente en especies de climas templados (Van der Driessche, 1974; Evans, 1979; Drechsel y Zech, 1994).

En un esfuerzo por sistematizar la poca y reciente información disponible sobre especies tropicales, Drechsel y Zech (1991), hicieron una recopilación exhaustiva (Cuadro 2), originando una guía de interpretación para análisis foliar, la cual puede ser usada como una orientación general sobre el tema (Drechsel y Zech,1991), ya en muchos casos se producen traslapes entre los rangos presentados.

Cuadro 2: Resultado de la recopilación hecha por Drechsel y Zech (1991), para los nutrimentos foliares considerados en este estudio para *T. grandis* y *G. arborea*

Especie	Nutrimento	Lugar	Edad (años)	Estado nutricional (% sobre peso seco)			
				Deficiente	Bajo	Intermedio	Alto
<i>T. grandis</i>	Ca	Africa	1.5			1.08 - 1.84	
		Africa	1.5	1.38		1.59 - 2.19	
		México	2			1.29	
		Africa	2			0.72 - 1.23	
		Africa	5	< 0.55		> 0.80	
	Mg	Africa	1.5			0.23 - 0.37	
		Africa	1.5	0.32		0.47 - 0.70	
		Africa	1.5	0.03 - 0.10		0.12 - 0.22	
		Africa	2.5			0.21 - 0.31	
		Africa	1.5	0.18 - 0.60		0.75 - 1.25	2.33
<i>G. arborea</i>	Ca	Africa	1.5	0.53		0.95 - 1.70	
		México	2.0			1.15	
		Africa	2.0			0.85 - 1.67	
		Africa	5	0.53 - 0.87		1.54 - 2.43	
		Africa	1.5			0.18 - 0.31	0.40
	Mg	Africa	1.5	0.11		0.12 - 0.20	
		México	2.0	0.13			
		Africa	2.0			0.20	
		Africa	5.0	< 0.10		> 0.12	
		Africa y México	1.3			1.18 - 2.20	
K	Africa y México	2.7, 11			0.53 - 1.27		
	Africa y Filipinas	1.2			0.50 - 0.94		
	Africa, México	3.7, 11			0.19 - 0.40		
	Africa, México	1.3	0.29		0.49 - 0.99		
	Africa y Filipinas	2.11	0.66 - 0.88		1.05 - 1.55		
P	Africa, México	1.3, 7, 11	0.05	0.08 - 0.09	0.11 - 0.19		
	Filipinas	2		0.15	0.27 - 0.36		

Al analizar la información del Cuadro 2, es posible apreciar la gran variabilidad de los resultados generados, ya que según Evans (1979) y Drechsel y Zech (1991), el contenido de nutrientes foliares es afectado por múltiples factores, entre otros, por: las condiciones del rodal, la edad del árbol y de la hoja, la estación y el procedimiento de muestreo. Van der Driessche (1974), detalla los factores fundamentales que afectan el muestreo de las hojas, para su posterior análisis foliar, estos son:

Posición de la copa: Tradicionalmente, los estudios tendientes a relacionar el índice de sitio con el contenido de nutrientes foliares, en rodales coetáneos han seleccionado árboles dominantes y codominantes, en tanto, en rodales discetáneos árboles con iluminación vertical plena (Cuadro 3).

Posición en la copa: Habitualmente el muestreo se realiza en la parte más alta de la copa y en hojas expuestas totalmente a la radiación solar (Cuadro 3) Evans (1979) al trabajar con *G. arborea* en Papua Nueva Guinea, determinó que a nivel de macronutrientes, solo el nitrógeno y el calcio presentan diferencias en relación a la posición del follaje en la copa, manteniéndose prácticamente constante el contenido de fósforo, potasio y magnesio. El contenido de nitrógeno disminuía al descender de la copa, en tanto el calcio presentaba un comportamiento inverso

Edad del follaje: Según Van der Driessche (1974), sin importar la edad de la planta, se presenta una variación en el contenido de nutrientes foliares según la edad fisiológica de la hoja y habitualmente se debería analizar el follaje desarrollado en el año en que se realiza la investigación (Cuadro 3)

Epoca de muestreo: El muestreo se debiera realizar aconsejablemente antes de la floración, en períodos de crecimiento vegetativo (Van der Driessche, 1974; Drechsel y Zech, 1991). Ya que en este período se supone que todo el potencial del árbol o gran parte de él, está destinado al crecimiento y no a la reproducción.

Número de árboles muestreados: La literatura reporta gran variabilidad en el número de árboles utilizados para análisis foliar. A modo de ejemplo, para *Eucalyptus deglupta* Drechsel y Zech (1994) recomiendan, según sea el nutriente de interés, desde 4 árboles (si interesa muestrear nitrógeno) a 44 (si interesa muestrear manganeso) por parcela.

A pesar de esto, tanto en *G. arborea*, como *T. grandis*, los autores que han estudios en estas especies (Cuadro 3) recomiendan entre 5 a 10 árboles por parcela.

Número de hojas: Según Van der Driessche (1974), hasta esa fecha no se había , establecido el número necesario de hojas, para el correspondiente análisis foliar; sin embargo, Drechsel y Zech (1994), señalan que de acuerdo al manual de Bosques Tropicales, se deben tomar entre 6 a 8 hojas por árbol muestreado. La excepción la constituye la investigación desarrollada por Herrera (1996), donde fue tomado un número excesivo de hojas y el autor no da explicación alguna al respecto (Cuadro 3).

Cuadro 3: Metodología utilizada para el análisis foliar según autor y año de publicación

Autor y año	Especie	Lugar	Posición de la copa	Posición en la copa	Edad del follaje	Número de arboles por parcela	Número de hojas por arbol
Böckheim, Leide y Frelich (1989)	<i>Pinus resinosa</i> Ait.	Wisconsin USA	Dominante y codominante	Del tercio superior de la copa viva	Maduras del año	5 arboles por 0.04 ha.	4 a 16
Zech y Drechsel (1992)	<i>G. arborea</i>	Liberia África	Dominante y codominante	hojas de los brotes terminales, de la parte superior	Hojas recientes del año	5 a 10 árboles	n.d.
Stuhrmann, Bergmann y Zech (1994)	<i>G. arborea</i>	Norte de Costa Rica	Dominante y codominante	hojas expuestas al sol de la parte superior	Maduras	al menos 5 árboles por 0.04 ha	n.d.
Drechsel y Zech (1994)	<i>T. grandis</i>	Oeste de África	Dominante y codominante	hojas de la parte superior	Maduras	10 arboles como mínimo por 0.05 a 0.1 ha.	6 a 8
Herrera (1996)	<i>Vochysia ferruginea</i> y <i>Cordia alliodora</i>	Costa Rica	arboles con iluminación vertical plena	hojas de la parte mas alta y libre de daños.	Maduras, del año	2 árboles de cada especie por 0.04 ha	de 100 a 300

n.d. = información no disponible

4.5. Productividad

Además de la determinación del índice de sitio, es recomendable clasificar los sitios de acuerdo a su productividad, para visualizar de mejor manera la potencialidad productiva de los sitios. Para las tres especies a estudiar, se han definido clases de productividad en la Provincia de Guanacaste, Costa Rica, las cuales según Vásquez y Ugalde (1995), son:

- ALTO: Plantaciones con el mejor crecimiento, superior al promedio
- MEDIO: Sitios buenos, alrededor del promedio, con un manejo apropiado tienen buenas posibilidades de aumentar su productividad
- BAJO: Son sitios por debajo del promedio, pueden considerarse sitios marginales

En este estudio, la variable de referencia para definir las clases de productividad fue el incremento medio anual en área basal (IMA-G) (Cuadro 4), ya que es una variable de fácil estimación y además el área basal máxima, es una buena estimación del potencial del sitio (Vásquez y Ugalde 1995). Posteriormente, se deberá determinar los rangos de variación de otras variables dasométricas, tales como: diámetro, altura y volúmenes, para caracterizar de mejor manera el crecimiento y la productividad de los sitios en estudio.

Cuadro 4: Rangos para el IMA en área basal para las especies en análisis, según Vásquez y Ugalde (1995) en la provincia de Guanacaste, Costa Rica.

Especie	IMA - G (m ² /ha/año) según clase de productividad		
	Alta	Media	Baja
<i>T. grandis</i>	≥ 2.5	1.6 - 2.4	≤ 1.5
<i>B. quinatum</i>	≥ 2.5	1.6 - 2.4	≤ 1.5
<i>G. arborea</i>	≥ 4.0	2.6 - 3.9	≤ 2.5

Anteriormente (acápito 4.3.2) se argumentó que la Hdom, era la variable menos influenciada por la densidad de rodal y debido a esa característica es utilizada para clasificar los sitios. La clasificación de los sitios por crecimiento y productividad, está fuertemente influenciada por el manejo, la oportunidad de su aplicación y el tiempo

transcurrido desde la aplicación hasta la medición³. Esta limitación, deberá tenerse en consideración al momento de realizar la clasificación de los sitios.

4.6. Validación

Según Alder (1980) y Reynolds (1984), el proceso de validación se debe desarrollar para determinar si la realidad está bien representada por el modelo propuesto. La validación independiente, es decir, validar utilizando información que no fue ocupada en el proceso de construcción del modelo, es lo más recomendable.

De toda la literatura citada en este trabajo, no se indica explícitamente si los modelos han sido validados, por lo tanto se desconoce si efectivamente dichos modelos representan fielmente la realidad. La presente investigación, utilizará el procedimiento desarrollado por Freese (1960) (Cuadro 6), el cual es un procedimiento habitual de validación (Gregoire y Reynolds, 1988; Reed y Jones, 1989) y la modificación propuesta por Vallejos (1979) para realizar una validación independiente de los modelos propuestos (Cuadro 5)

En el proceso de validación, según Peters (1974) y Vallejos (1979), lo primero es determinar la naturaleza del sesgo, para esto se debe probar (Prueba t-student) la significancia tanto del intercepto, como del coeficiente de regresión entre los valores esperados y los valores observados. Dependiendo del resultado de la prueba realizada, es posible diferenciar cuatro situaciones, la cuales se ejemplifican en el Cuadro 5 y Figura 1.

Cuadro 5: Expresiones posibles del sesgo en la función de índice de sitio

Intercepto	Coefficiente de regresión	Tipo de sesgo
$a = 0$	$b = 1$	Estimación insesgada
$a \neq 0$	$b = 1$	Estimación sesgada de manera constante
$a = 0$	$b \neq 1$	Estimación sesgada de manera variable
$a \neq 0$	$b \neq 1$	Estimación sesgada de manera variable

³ GALLOWAY, G. 1996. Efecto del manejo en el crecimiento y la productividad. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Comunicación personal.

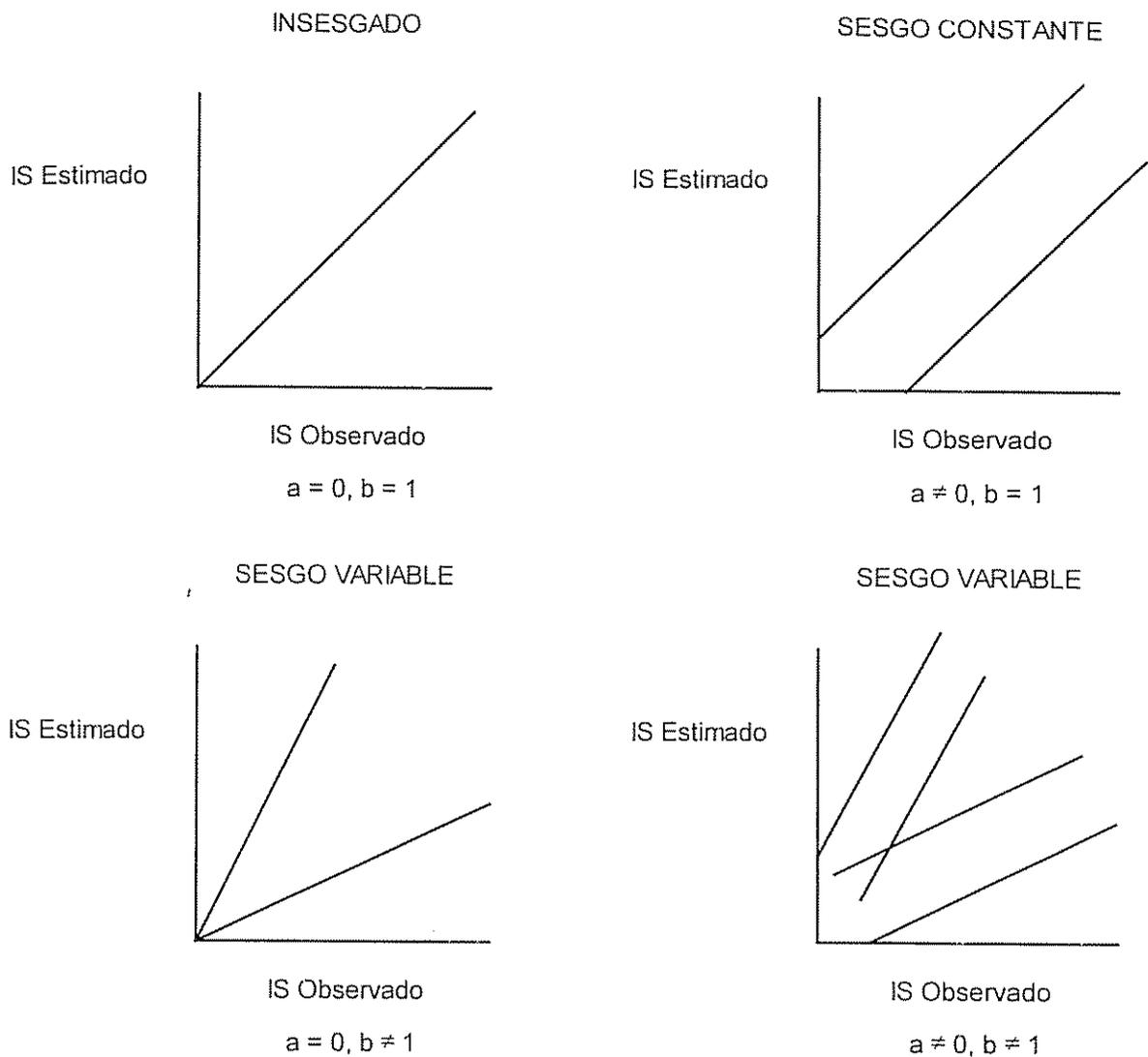


Figura 1: Expresiones posibles del sesgo en la función de índice de sitio

Determinado el tipo de sesgo que presente el modelo, corresponde aplicar el test de Freese (1960) (Cuadro 6), para evaluar la exactitud del modelo.

Cuadro 6: Evaluación de la exactitud de la estimación de la función de índice de sitio

Tipo de sesgo	Fórmula a utilizar
Estimación insesgada	$x^2 = \left(\frac{196}{p}\right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{o_i} - 1\right)^2$ <p>Con n grados de libertad</p>
Estimación con sesgo constante	$x^2 = \sum_{i=1}^n j_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n j_i\right)^2}{n}$ <p>Con n-1 grados de libertad</p>
Estimación con sesgo variable	$x^2 = \left[\sum_{i=1}^n j_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n j_i\right)^2}{n} \right]^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n j_i i_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n j_i\right)\left(\sum_{i=1}^n i_i\right)}{n} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n i_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n i_i\right)^2}{n} \right]}$ <p>Con n-2 grados de libertad</p>

Donde:

$$j_i = \frac{e_i}{\frac{p}{196} o_i}$$

$$i_i = \frac{1}{o_i}$$

e_i = Valor estimado de la i-ésima observación

o_i = Valor observado de la i-ésima observación

p = Valor del error admisible en porcentaje

196 = Valor constante, que se deriva del valor de la desviación normal a una probabilidad del 5% a dos colas, amplificado por 100, para introducir el valor "p" en porcentaje.

La condición preponderante para aceptar el modelo, es que esté dentro de los límites de exactitud requeridos, si esto no ocurre el modelo debe ser descartado. El límite es definido por el investigador en base a la experiencia que posea al respecto.

La presencia de sesgos puede ser eliminada, si la situación así lo amerita, utilizando un modelo de predicción inversa (Ostle, 1973, citado por Vallejos, 1979), de la siguiente forma:

$$\text{IS observado} = \frac{\text{IS estimado} - a}{b}$$

Donde:

Índice observado = índice de sitio observado. Es el valor del índice de sitio que las diferentes unidades muestrales presenta

Índice estimado = índice de sitio estimado. Es el valor del índice de sitio que el modelo sujeto a validación estima para las diferentes unidades muestrales

a y b = Intercepto y coeficiente de regresión, definidos en el Cuadro 5 y Figura 1

5. MATERIALES Y METODO:

5.1. Localización área de estudio

La extensa área de estudio (Figura 2 a la Figura 4), se centra con especial interés en la Región del Pacífico, en las provincia de Guanacaste, aunque se incluyó cantonés de la provincia de Alajuela (San Carlos), San José (Pérez Zeledon) y Puntarenas (Osa), Costa Rica, tanto en ensayos montados por el proyecto Madeleña del CATIE en sitios particulares, así como en nuevos sitios de compañías privadas, que tienen programas de reforestación.

Al menos se presentan siete zonas de vida, las cuales según el sistema de Holdridge y mapificado por Hartshorn (1983), serían: bosque húmedo premontano (bhP), bosque húmedo premontano, transición basal (bhPtb), bosque húmedo premontano, transición a húmedo (bhPth), bosque húmedo tropical (bhT), bosque húmedo tropical, transición perhúmedo (bhTtPh), bosque seco tropical (bsT) y bosque seco tropical, transición a húmedo (bsTth), con precipitaciones medias anuales que varían entre 1247 a 3662 mm, de 2 a 7 meses con precipitaciones inferiores a los 100 mm y temperaturas medias anuales entre 22.6 a 28.4 °C. Las elevaciones van desde el nivel del mar hasta los 570 msnm.

5.2. Materiales

El listado de materiales utilizados en la fase de campo, fueron los siguientes:

- Clinómetro Suunto o vara telescópica
- Tijeras podadoras
- Cinta diamétrica
- Barreno para muestreo de suelos
- Brújula
- Machete
- Altimetro
- Bolsas plásticas
- Demarcadores
- Rotuladores

El listado de materiales utilizados en la fase de oficina fueron los siguientes:

- Computadora personal
- Microsoft Excel
- Software estadístico Statgraphics 6.0 y Systat 5.0

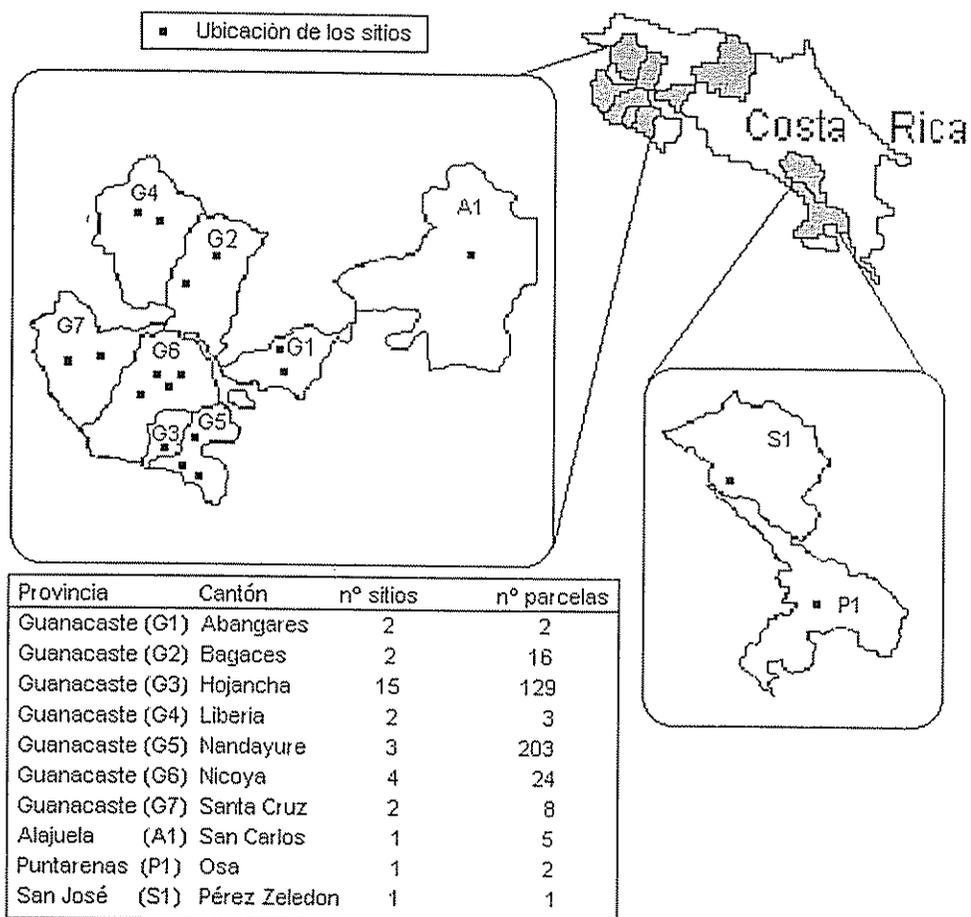


Figura 2: Localización de los sitios con parcelas de *T. grandis*

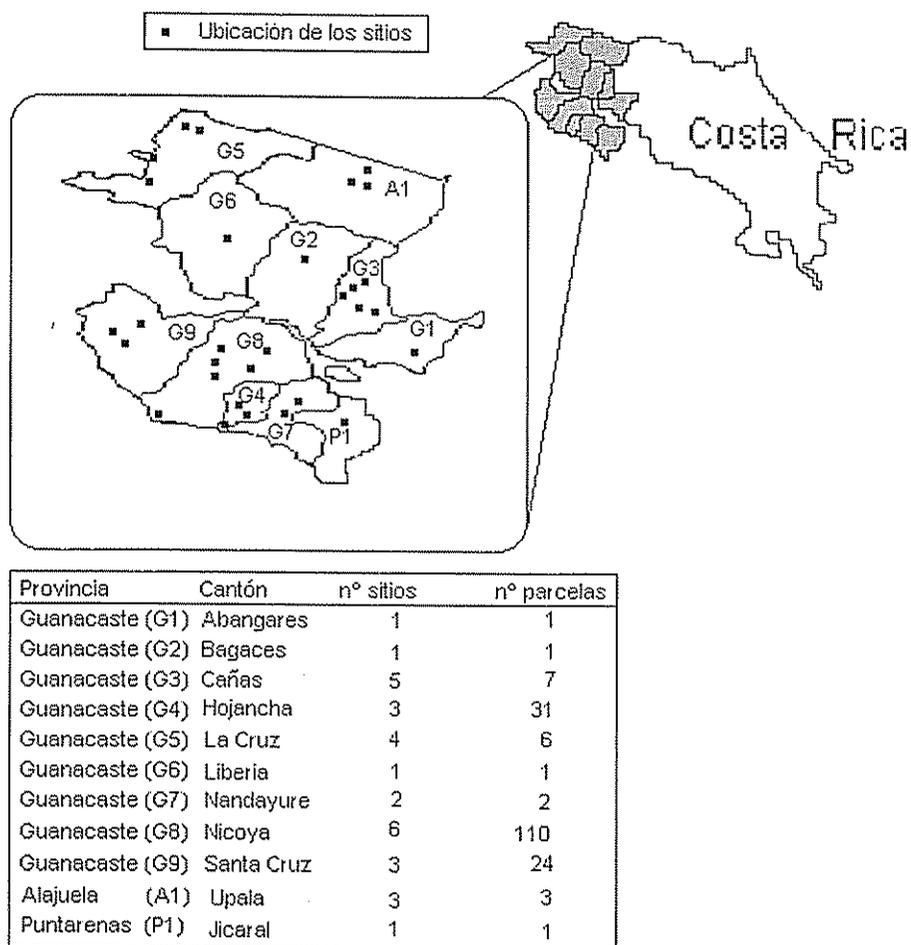


Figura 3: Localización de los sitios con parcelas de *B. quinatum*

Para esta especie, solo aumento el tamaño muestral (Cuadro 7), pero se mantuvieron las zonas de vida muestreadas por Vásquez y Ugalde (1994).

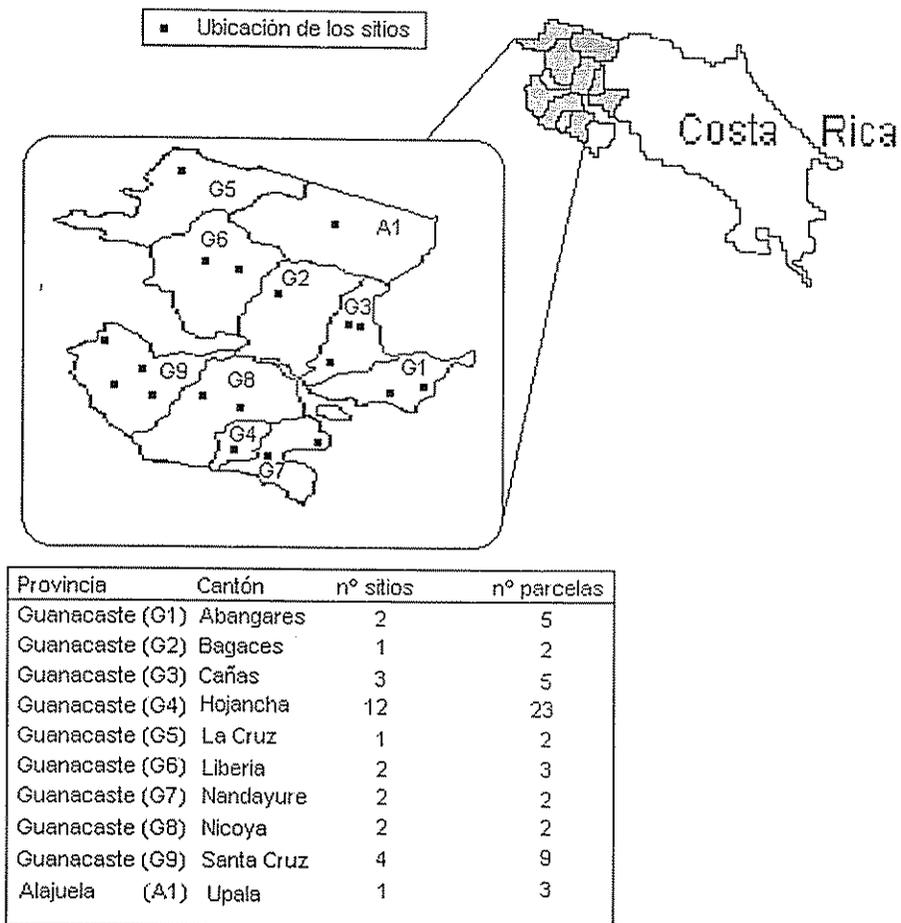


Figura 4: Localización de los sitios con parcelas de *G. arborea*

Al igual que *B. quinatum*, esta especie incluyó las mismas zonas de vida del estudio desarrollado por Vásquez y Ugalde (1994).

5.3. Método

El método desarrollado está comprendido tanto por labores de campo, como de oficina, las cuales son detalladas a continuación:

5.3.1. Labores de campo

Como su nombre lo indica, fueron las comprendidas en la fase de campo, siendo las siguientes:

5.3.1.1. Tamaño muestral

El tamaño muestral para las tres especies, estuvo determinado en gran medida por los recursos económicos disponibles, incorporándose información almacenada en la base de datos del sistema MIRA (Ugalde, 1988) de los sitios contenidos en el estudio desarrollado por Vásquez y Ugalde (1994), además de nuevos sitios en las Provincias de Guanacaste, Alajuela, San José y Puntarenas, las cuales fueron medidos entre los meses de marzo a mayo de 1996.

En el Cuadro 7, aparece el resumen de la información, en tanto en el Cuadro 8, es posible observar, el listado detallado de las sitios y parcelas establecidas.

Cuadro 7: Tamaños muestrales según especie y tipo de análisis a desarrollar, para la presente investigación y la llevada a cabo por Vásquez y Ugalde (1994)

Tipo de análisis	Especies					
	<i>T. grandis</i>		<i>B. quinatum</i>		<i>G. arborea</i>	
	Este estudio	Vásquez y Ugalde (1994)	Este estudio	Vásquez y Ugalde (1994)	Este estudio	Vásquez y Ugalde (1994)
Productividad	394	23	185	35	59	37
Índice de sitio edafoclimático	64	21	42	30	33	26
Validación del índice de sitio	16		10		8	
Análisis Foliar	13		15		1	

Cuadro 8: Listado de localización de los sitios y parcelas analizadas en el presente estudio, según cantón y especie

Cantón	Localidad del sitio	<i>T. grandis</i>		<i>B. quinatum</i>		<i>G. arborea</i>	
		Número de parcelas	Número de parcelas	Número de parcelas	Número de parcelas		
Abangares	Colorado	1			3		
	Costa de Pájaros		1				
Bagaces	La Palma	1			2		
	Bagaces	12			2		
	La Virgen						
	Peñón de la Bajura	4					
Cañas	San Pedro		1				
	G. Montezuma		1		3		
	Javilla		2				
	La Pacífica		2				
Hojancha	La Roca		1		1		
	Paso Lajas		1				
	Tiquirusas						
	Bajo Beneficio	3			1		
La Cruz	Betania	1			1		
	Cuesta Blanca	1			2		
	Estrada Rávago		2				
	Guapinol	1					
	Lajas	2			2		
	La Arena	5			2		
	La Ceiba		1				
	La Mansión	1					
	La Maravilla	1			2		
	La Susuruza	1			1		
Osa	La Vigía	1					
	Los Angeles	1			1		
	Matambú	1			2		
	Matina				1		
	Pilangosta	4			1		
	Pila Rayada				5		
	Puerto Carrillo	100			4		
	San Gerardo	2			1		
	San Rafael	1			1		
	Santa Marta	5			1		
Upala	Cuanjiquil		2				
Nicoya							
Pérez Zeledón							
Santa Cruz							
Santa Rosa							
Upala							

5.3.1.2. Ubicación y medición de las parcelas

Dentro de cada finca, se seleccionaron parcelas representativas de las condiciones generales de la misma, en base a la metodología de sistema MIRA (Ugalde, 1995), desarrollada por el proyecto Madeleña. El tamaño general de las parcelas varió de 36 a 81 árboles, según las condiciones y requerimientos de los dueños de las fincas.

5.3.1.3. Muestreo de suelos y foliar

Este muestreo se hizo de manera sistemática, identificando lotes diferenciados (grupos de parcelas con características generales similares) capturando la variabilidad de las plantaciones. Dentro de los lotes diferenciados, se hizo la medición en aquellas parcelas de más edad, ya que estas reflejarían de mejor forma la calidad del sitio, aunque en algunos casos dependerá del manejo recibido (acápite 4.5)

La muestra de suelo, de las parcelas incorporadas por primera vez en este estudio, fue tomada en el centro de la parcela, la cual estaba compuesta por dos submuestras 0 - 20 cm y 20 - 40 cm de profundidad. Las muestras de suelos, consideradas en el estudio de Vásquez y Ugalde (1994), solo consideran una profundidad de 0 - 20 cm

La muestra foliar por parcela, estuvo conformada por hojas de 5 a 10 árboles dominantes y codominantes, cercanos al centro de la parcela. Las hojas se ubicaron en el tercio superior de la copa viva, iluminadas por completo y libre de daños o enfermedades.

5.3.1.4. Variables contenidas en el estudio

Fueron registradas un total de cinco grupos de variables, las cuales son detalladas a continuación:

Variables de los árboles

Las variables medidas directamente a todo los árboles de la parcela y registradas en formularios de sistema MIRA, fueron:

- Altura total en dm
- Dap en mm

A partir de estas variables y la obtención de información de la parcela, se estimaron y obtuvieron las siguientes variables:

- Edad de plantación en años
- Número inicial de árboles plantados por ha (N1)
- Número actual de árboles plantados por ha (N2)
- Altura promedio de los árboles por hectárea (H)
- Altura promedio de los 100 árboles más gruesos (Hdom) por hectárea
- Índice de Sitio a una edad base de 10 años para las tres especies (IS)
- Area basal en m²/ha (G)
- Volumen total con corteza, utilizando para todas las especies, la fórmula
$$V1 = \pi/4 * Dap^2 * H * 0.46 * N2$$

Donde 0.46 = es el factor de forma, que se considera constante para las tres especies
- Volumen comercial en base a funciones desarrolladas, por otros autores, para las especies en estudio (con posterioridad, se referirá a esto como V2):
- *T. grandis* Fuente Keogh (1987); citado por Chaves y Fonseca (1991)

$$V2 = (0.0359 + 0.000022 Dap^2 H) * N2$$

Donde:

V2 = Volumen sin corteza en m³/ ha, desde 0.3 m de altura, hasta 8 cm de diámetro menor

Dap = Diámetro a 1.3 m con corteza en cm

H = Altura total del árbol en m

- *B. quinatum* Fuente Hughell (1991); citado por CATIE (1991)

$$V2 = (\exp (-8.0758 + 1.2678 \text{ Ln } (Dap) + 0.9729 \text{ Ln } (H))) * N2$$

Donde:

V2 = Volumen sin corteza m³ /ha

Dap = Diámetro a 1.3 m con corteza en cm

H = Altura total del árbol en m

- *G. arborea* Fuente Salazar y Palmer (1984); citado por Murillo y Valerio (1991)

$$V2 = (\exp (-9.63 + 1.785 \text{ Ln } (Dap) + 0.8189 \text{ Ln } (H))) * N2$$

Donde:

V2 = Volumen sin corteza en m³ / ha

Dap = Diámetro a 1.3 m con corteza en cm, hasta 10 cm de diámetro menor

H = Altura total del árbol en m

En el Cuadro 9, aparecen resumidas las variables de los árboles, para la tres especies. El volumen comercial fue calculado para aquellos sitios, que por sus características estaban incluidos dentro del rango de construcción de dichas funciones.

Cuadro 9: Promedio de variables de los árboles de la totalidad de parcelas, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	Edad (años)	N1 (arb/ha)	N2 (cm)	dap (cm)	H (m)	Hdom (m)	IS (m)	G (m²/ha)	V1 (m³/ha)	V2 (m³/ha)	Dap (cm/año)	Incremento medio anual				
														H (m/año)	G (m²/ha/año)	V1 (m³/ha/año)	V2 (m³/ha/año)	
T. grandis	Abangares	Colorado	14.8	1086	843	18.30	18.60	22.30	20.14	22.17	189.71	145.79	1.24	1.26	1.50	12.82	9.85	
		La Palma	11.4	2500	802	19.60	17.30	19.30	18.61	24.20	192.57		1.72	1.52	2.12	16.69		
	Bagaces	Bagaces	3.1	1587	1240	5.62	4.42	5.75	9.20	3.33	7.70		1.84	1.08	2.46			
		Peñón de la Bajura	12.6	1361	660	18.55	17.25	19.38	18.23	18.12	148.10	113.88	1.49	1.38	1.47	11.97	9.18	
	Hojancha	Betania	6.1	1434	984	15.35	15.00	16.80	19.90	15.60	107.85	90.66	2.50	2.51	2.62	18.18	14.92	
		Cuesta Blanca	6.0	1111	433	16.71	13.97	15.59	18.44	9.50	61.02	52.70	2.79	2.33	1.58	10.17	8.78	
		Guapinol	5.4	1111	300	17.93	14.50	16.09	19.79	7.57	50.52	41.54	3.31	2.68	1.40	9.33	7.67	
		La Arena	7.9	1497	697	17.14	15.14	16.59	17.88	15.20	107.08	90.23	2.17	1.94	1.97	13.79	11.73	
		La Mansión	2.8	1111	511	12.27	11.28	13.06	22.12	6.04	31.35		4.46	4.10	2.20	11.40		
		La Susuruza	4.9	1111	711	13.70	11.51	13.28	16.99	10.48	55.49		2.79	2.34	2.13	11.29		
		La Vigía	2.8	1111	578	9.98	10.18	12.02	20.02	4.52	21.17		3.52	3.59	1.60	7.47		
		Lajas	5.0	1111	539	15.12	14.43	16.03	20.65	9.66	63.94	58.27	3.09	2.99	1.97	13.22	12.02	
		Los Angeles	3.9	1111	600	10.50	8.49	10.43	14.74	5.20	20.29		2.68	2.17	1.33	5.18		
		Matambú	6.7	926	435	18.24	13.41	15.07	17.15	11.37	70.12	58.31	2.74	2.01	1.70	10.52	8.75	
		Pianguasta	10.1	1758	631	19.12	19.61	21.20	21.32	17.99	165.58	123.49	1.99	2.02	1.82	16.32	12.33	
		Puerto Carrillo	6.6	1046	750	16.20	14.21	15.24	17.61	15.40	103.10	91.13	2.53	2.22	2.38	15.70	13.97	
		San Gerardo	6.7	1356	598	18.07	15.26	16.80	19.16	15.49	110.15	88.52	2.73	2.30	2.27	16.06	12.93	
		San Rafael	4.0	1111	600	13.16	11.36	13.13	18.38	8.16	42.65		3.29	2.84	2.04	10.66		
		Santa Marta	7.0	1584	811	16.19	14.78	16.53	18.70	12.86	85.17	66.80	2.40	2.19	1.78	11.82	9.51	
	Liberia	Curubande	5.3	1268	907	12.35	8.50	9.55	11.85	11.18	45.06		2.33	1.60	2.11	8.50		
		El Salto	13.2	1316	658	17.10	14.60	16.40	15.23	15.11	101.49	85.42	1.30	1.11	1.14	7.69		
	Nandayure	Acoyada	11.8	1433	1287	18.90	19.70	22.60	21.59	36.11	327.20	245.45	1.60	1.67	3.06	27.73	20.80	
		Moravia	2.5	948	878	8.88	9.64	11.44	20.64	5.83	29.47		3.61	3.91	2.36	11.96		
		Punta Coyote	3.9	1111	923	12.13	13.14	14.91	21.10	11.25	73.82		3.09	3.35	2.83	18.41		
		Zapotal	7.6	1536	1285	15.40	17.60	19.70	21.44	23.94	193.78	164.13	2.03	2.32	3.15	25.50	21.60	
	Nicoya	Buenavista	6.6	1471	931	16.00	17.60	18.90	21.59	18.72	151.55	125.71	2.42	2.67	2.84	22.96	19.05	
		Garza	3.0	816	681	7.08	6.98	8.96	14.53	2.75	9.21		2.38	2.34	0.92	3.09		
		Mansión	12.5	1014	663	20.30	20.90	23.70	22.31	21.46	206.30	149.43	1.62	1.67	1.72	16.50	11.95	
		Quebrada Honda	10.2	1000	541	20.07	15.38	17.14	17.11	15.92	115.59	89.81	2.00	1.54	1.60	11.18	8.97	
	Osa	Dominical	8.0	1111	986	14.86	13.55	16.25	17.72	17.62	114.61		1.85	1.69	2.20	14.33		
	P. Zeledón	Barú	2.0	1111	952	5.72	8.09	9.20	10.21	2.45	9.11		2.86	4.03	1.23	4.55		
	San Carlos	Santa Rosa	2.7	1111	955	10.52	10.32	12.18	20.99	8.18	38.99		3.94	3.87	3.07	14.62		
	Santa Cruz	Río Tabaco	4.2	966	887	9.55	7.92	9.81	13.46	7.00	29.89		2.29	1.89	1.63	6.83		
		San Juan	7.6	1061	952	14.20	14.70	16.00	17.41	15.08	101.95	96.26	1.87	1.93	1.98	13.41	12.67	

Continuación ...

Cuadro 9: Promedio de variables de los árboles de la totalidad de parcelas, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	Edad (años)	N1	N2	dap (cm)	H (m)	Hidom (m)	IS (m)	G (m ² /ha)	V1 (m ³ /ha)	V2 (m ³ /ha)	Incremento medio anual				
													Dap (cm/año)	H (m/año)	G (m ² /ha/año)	V1 (m ³ /ha/año)	V2 (m ³ /ha/año)
B. <i>quintatum</i>	Abangares	Costa de Pájaros	13.2	1111	603	28.90	19.60	23.00	19.07	39.56	356.63	241.14	2.19	1.48	3.00	27.02	18.27
	Bagaces	San Pedro	12.3	1465	732	19.80	10.60	7.40	10.48	22.54	109.90	99.67	1.61	0.86	1.83	8.93	8.10
	Cañas	G. Montezuma	4.2	1146	1114	10.30	4.60	6.50	11.64	9.28	19.64		2.45	1.10	2.21	4.68	
		Javilla	5.8	947	928	9.65	4.75	9.00	8.66	6.79	14.88		1.66	0.82	1.17	2.57	
		La Pacifica	6.5	1744	1496	5.45	3.70	10.50	6.69	6.20	15.10		0.76	0.54	0.73	1.74	
		La Roca	15.5	2500	741	22.90	11.90	9.00	11.64	30.52	167.06	135.78	1.48	0.77	1.97	10.78	8.76
		Paso Lajas	2.8	2500	956	4.10	2.90	2.30	11.41	1.26	1.68		1.46	1.04	0.45	0.60	
	Hojancha	Estrada Rávago	6.4	1111	998	15.50	10.85	13.45	18.43	19.32	106.66		2.47	1.65	2.98	15.44	
		La Ceiba	13.5	1558	986	15.90	10.20	8.70	9.54	19.58	91.86		1.18	0.76	1.45	6.80	
		Matambú	4.7	973	973	15.70	8.30	4.00	16.12	18.84	71.92		3.34	1.77	4.01	15.30	
		Puerto Carrillo	11.0	1157	533	19.54	11.23	11.83	11.60	15.53	83.15	81.92	1.77	1.02	1.41	7.52	7.36
	La Cruz	Cuanajiquil	7.3	1235	1004	16.00	10.80	15.70	15.60	20.44	106.37		2.28	1.48	2.82	14.01	
		El Gallo	4.5	1053	895	10.20	6.20	13.20	12.64	7.31	20.86		2.27	1.38	1.63	4.64	
		El Jobo	4.4	1194	1162	8.40	4.70	9.80	10.51	6.55	14.96		1.93	1.08	1.50	3.42	
		Juan Santamaria	4.4	1173	996	12.80	7.60	15.60	16.67	12.82	44.81		2.91	1.73	2.91	10.18	
	Liberia	El Salto	4.8	1512	1420	6.60	3.40	16.90	7.22	4.86	7.60		1.38	0.71	1.01	1.58	
	Nandayure	Carmona	4.6	1032	1032	11.40	6.60	4.10	13.50	10.53	31.98		2.48	1.43	2.29	6.95	
		San Martín	8.7	1289	1263	15.40	11.60	16.90	15.07	23.53	125.53		1.77	1.33	2.70	14.43	
	Nicoya	Buнавista	4.8	1225	1225	11.90	7.40	15.30	15.66	13.62	46.38		2.48	1.54	2.84	9.66	
		Copal	5.0	1600	1575	14.28	7.24	8.66	14.80	25.21	84.02		2.87	1.46	5.07	16.90	
		Garza	3.6	433	404	8.05	4.42	5.59	12.60	2.58	6.92		2.20	1.22	0.68	1.77	
		Quirimán	4.8	1111	1111	12.10	6.80	11.70	15.31	12.78	39.96		2.52	1.42	2.66	8.33	
		Varillal	7.8	614	539	20.20	11.80	8.80	15.81	17.27	93.76	83.55	2.59	1.51	2.21	12.02	10.71
		Zapote	3.8	968	968	13.20	6.50	9.70	15.94	13.25	39.61		3.47	1.71	3.49	10.42	
	Puntarenas	Jicaral	11.4	1111	585	24.00	17.60	5.80	17.88	26.46	214.26	166.47	2.11	1.54	2.32	18.79	14.60
	Santa Cruz	Belen	7.7	1111	998	14.90	7.90	9.60	11.73	17.40	63.24		1.94	1.03	2.26	8.21	
		Río Tabaco	4.4	829	730	6.06	3.36	4.52	8.22	3.10	8.13		1.35	0.77	0.64	1.58	0.00
		Sta. Rosa	4.8	1111	748	14.30	7.80	5.70	15.84	12.01	43.10		2.98	1.63	2.50	8.98	
	Upala	C. Agropecuario	6.8	2500	1512	9.00	5.00	8.90	9.70	9.62	22.12		1.32	0.74	1.41	3.25	
		El Carmen	10.8	2500	1419	18.70	15.10	8.10	15.98	38.97	270.70	253.55	1.73	1.40	3.61	25.06	23.48
		Municipalidad	9.1	2500	895	19.20	15.70	12.30	18.74	25.91	187.14	171.75	2.11	1.73	2.85	20.57	18.87

Continuación ...

Cuadro 9: Promedio de variables de los árboles de la totalidad de parcelas, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	Edad (años)	N1 (arb/ha)	N2 (arb/ha)	dap (cm)	H (m)	Hdom (m)	IS (m)	G (m ² /ha)	V1 (m ³ /ha)	V2 (m ³ /ha)	Incremento medio anual				
													Dap (cm/año)	H (m/año)	G (m ² /ha/año)	V1 (m ³ /ha/año)	V2 (m ³ /ha/año)
G. arborea	Abangares	Colorado	5.5	2232	1187	17.57	15.43	23.33	24.57	19.93	158.38	88.63	3.83	3.10	4.93	26.90	16.80
		La Palma	8.1	1086	565	23.40	18.55	20.00	21.77	27.09	248.81	129.39	3.05	2.60	3.07	26.96	14.46
	Bagaces	La Virgen	13.4	1205	659	13.10	9.45	11.50	9.31	8.75	37.95	26.47	0.95	0.65	0.66	2.84	1.98
	Cañas	G. Montezuma	6.6	1083	1051	13.37	8.60	10.00	12.76	14.71	58.38	41.04	2.03	1.27	2.28	8.88	6.27
		La Roca	15.5	2500	740	29.70	18.80	25.00	23.42	51.27	443.35	228.69	1.90	1.20	3.31	28.60	14.75
		Tiquirasas	4.5	1134	1065	17.20	16.80	20.00	22.82	24.75	191.23	113.22	3.80	3.70	5.50	42.50	25.16
	Hojancha	Bajo Beneficio	7.0	1111	267	27.02	23.86	26.00	26.60	15.31	168.04	84.72	3.86	3.41	2.19	24.01	12.10
		Betania	5.8	1111	468	24.35	21.89	24.50	25.51	18.41	183.30	97.06	4.22	3.87	3.43	33.68	18.03
		La Arena	4.5	1082	688	17.85	16.05	17.50	21.41	16.95	127.60	74.77	3.95	3.55	3.77	28.35	16.62
		La Maravilla	9.3	1250	558	21.80	16.95	18.50	20.93	18.83	176.23	90.87	2.50	1.95	2.10	15.99	8.87
		La Susuruza	6.1	1111	300	20.68	13.98	17.00	19.59	10.08	64.80	38.12	3.40	2.30	1.66	10.65	6.27
		Lajas	4.2	1111	311	17.27	15.47	16.50	22.17	7.44	54.69	32.38	4.13	3.70	1.77	12.95	7.68
		Los Angeles	6.7	1111	333	26.31	18.74	21.00	22.85	18.10	156.06	82.68	3.95	2.81	2.72	23.41	12.40
		Matambu	6.3	1356	375	20.05	15.02	18.00	20.27	11.77	81.21	47.50	3.22	2.41	1.91	13.15	7.70
		Matina	6.3	1600	704	21.06	17.65	20.00	22.23	24.52	199.10	111.85	3.33	2.79	3.87	31.44	17.66
		Pilangosta	8.2	1424	348	24.22	19.05	22.40	24.60	16.06	152.53	79.22	3.47	2.62	2.22	18.24	9.92
		Pita Rayada	4.8	1111	483	17.37	13.66	16.75	20.69	11.12	70.79	43.08	3.82	3.00	2.45	15.01	9.27
		San Gerardo	7.3	1111	467	20.54	16.70	20.00	20.95	15.47	118.87	67.82	2.80	2.28	2.11	16.21	9.25
		San Rafael	6.7	2500	2397	8.20	6.30	9.00	11.39	12.66	36.68	30.42	1.40	1.10	1.89	5.48	4.54
		Santa Marta	7.3	1111	300	22.61	18.10	21.00	22.07	12.05	100.29	55.23	3.08	2.47	1.64	13.68	7.53
La Cruz		El Gallo	4.1	951	863	17.75	17.25	21.00	23.88	21.49	171.79	100.02	4.35	4.20	5.32	42.54	24.76
Liberta		Curubande	5.3	1178	828	17.00	11.70	14.00	17.40	18.79	101.15	64.10	3.20	2.20	3.55	19.08	12.09
		El Sallo	10.0	1445	815	18.50	12.85	15.00	15.68	21.36	128.65	77.89	1.90	1.30	2.30	13.05	8.06
Nandayure		Carmona	4.5	1114	818	18.00	19.90	24.00	25.27	20.82	190.55	108.34	4.00	4.40	4.63	42.34	24.08
		San. Pedro	4.5	972	754	16.20	16.30	18.00	21.35	15.54	116.53	70.27	3.60	3.60	3.45	25.90	15.62
Nicoya		Guastomatal	4.5	1137	1044	16.30	16.20	19.00	21.92	21.79	162.34	97.87	3.60	3.60	4.84	36.08	21.75
		Quiriman	4.7	1225	1125	15.50	16.40	18.00	21.62	21.23	160.14	97.38	3.30	3.50	4.52	34.07	20.72
Santa Cruz		El Socorro	4.7	1111	1111	13.30	12.90	14.00	18.60	15.44	91.59	60.12	2.80	2.70	3.28	19.49	12.79
		Potrero	6.2	1060	841	17.25	16.98	19.25	21.42	20.13	164.43	95.22	2.78	2.73	3.24	26.13	15.19
Upala		Río Tabaco	4.7	717	623	12.89	8.76	11.33	15.95	8.85	43.05	28.26	2.76	1.88	1.90	9.23	6.06
		San Juan	6.4	1512	926	18.70	21.10	25.00	26.05	25.43	246.85	137.74	2.90	3.30	3.97	38.57	21.52
		Dos Ríos	1.4	2500	2060	6.67	4.03	11.33	20.56	8.18	17.55		4.67	2.90	5.20	10.60	

Variables Climáticas

Las variables contempladas en esta investigación, fueron recabadas de los registros más recientes del Instituto Meteorológico Nacional. En cada Caso, se consideró la estación más representativa por altitud y distancia. Las variables incluidas en el trabajo fueron:

- Precipitación media anual, en mm (PMA)
- Temperatura media anual, en °C (TMA)
- Déficit hídrico, en número de meses con menos de 100 mm (DEFHID)

Variables fisiográficas

Las variables incluidas en esta investigación y su codificación fueron las siguientes:

- Elevación sobre el nivel del mar, en m (ELEV)
- Posición Topográfica (PTOP)
1 = Cima, 2 = Pendiente media, 3 = Pendiente inferior y 4 = Fondo plano
- Drenaje (DREN)
1 = Libre y 2 = Impedido
- Pedregocidad (PEDRE)
1 = $\leq 10\%$ y 2 = $> 10\%$
- Erosión (ERO)
1 = Ninguna, 2 = Moderada, 3 = Severo y 4 = Muy severo
- Pendiente en porcentaje (PEND)
- Aspecto (ASPEC)
1 = Norte, 2 = Este, 3 = Sur, 4 = Oeste y 5 = Llano
- Viento (VIENTO)
1 = Poco viento, no afecta el crecimiento, 2 = Moderado, afecta poco el crecimiento y 3 = Muy ventoso, afecta el crecimiento

En el Cuadro 10, es posible apreciar tanto la variables climáticas como fisiográficas de las tres especies en estudio.

Cuadro 10: Promedio por sitio de características climáticas y fisiográficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	ELEV (m)	PMA (mm)	TMA (°C)	DEFHID (# meses)	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	PEND	ASPE	VIENTO
<i>T. grandis</i>	Abangares	Colorado	30.0	2256.0	26.8	5	4	1	1	1	5.0	5	1
	Bagaces	Bagaces	43.0	1369.0	27.5	7	2	1	2	1	6.8	4	2
		Peñón de la Bajura	49.0	1788.0	27.9	6	4	1	1	3	7.8	4	1
	Hojancha	Betania	139.0	2102.0	27.0	5	2	1	1	3	39.0	2	2
		Guapinol	300.0	2102.0	26.3	4	3	1	1	2	25.0	3	1
		La Arena	357.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	2	23.2	2	1
		La Mansión	100.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	1	16.0	2	1
		La Vigía	75.0	2102.0	26.3	5	3	1	1	2	22.0	1	2
		Lajas	173.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	2	30.0	4	1
		Los Angeles	320.0	2102.0	26.3	5	3	1	1	2	26.0	2	2
		Matambu	300.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	1	25.0	3	1
		Pilangosta	391.0	2102.0	26.4	5	3	1	1	2	23.0	4	1
		Puerto Carrillo	103.0	1703.5	26.1	5	2	1	1	2	48.0	2	1
	Santa Marta	San Rafael	380.0	2102.0	26.3	4	1	1	1	2	35.0	3	1
		Santa Marta	93.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	2	19.3	3	2
	Liberia	Curubande	563.0	1878.0	26.8	6	4	1	2	2	7.5	4	3
		El Salto	100.0	1518.0	26.8	6	4	1	1	1	2.0	5	2
	Nandayure	Acoyada	26.0	1834.0	26.3	5	4	1	1	1	1.0	5	1
		Punta Coyote	110.0	1572.0	26.4	6	3	1	1	2	16.1	3	1
		Zapotal	40.0	2536.0	27.0	5	4	1	1	2	5.0	3	1
Nicoya	Barra Honda	80.0	1718.0	26.5	5	2	1	2	2	15.0	1	1	
	Buenavista	35.0	2496.0	27.1	5	4	1	1	2	12.0	4	1	
	Garza	93.0	2582.5	26.7	5	4	1	1	2	8.3	4	1	
	Mansión	30.0	1690.0	27.1	6	4	1	1	2	8.0	4	2	
	Quebrada Honda	55.0	1762.0	26.7	5	4	1	1	3	10.5	4	1	
Osa	Dominical	100.0	3654.5	27.0	3	2	1	1	3	41.5	3	2	
	Barú	45.0	3647.0	27.0	3	4	1	1	2	1.0	5	2	
Santa Cruz	Río Tabaco	107.0	2880.0	26.5	5	3	2	1	2	13.5	2	1	
	San Juan	90.0	1882.0	27.5	5	4	1	1	1	3.0	5	1	

Continuación

Cuadro 10: Promedio por sitio de características climáticas y fisiográficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	ELEV (m)	PMA (mm)	TMA (°C)	DEFID (# meses)	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	PEND	ASPE	VIENTO
<i>B. quinatum</i>	Bagaces	San Pedro	415.0	1396.0	27.0	7	4	1	1	1	0.0	5	1
	Cañas	G. Montezuma	450.0	2560.0	27.0	2	4	1	1	1	5.0	1	3
		Javilla	122.5	1247.0	26.0	6	3	1	1	2	17.5	4	3
	Hojancha	La Pacifica	45.0	1724.0	27.8	4	4	1	1	1	1.0	5	3
		Estrada Rávago	40.0	2536.0	27.0	5	4	1	1	1	1.0	4	1
	La Cruz	La Ceiba	390.0	2102.0	26.5	5	1	1	1	1	10.0	4	3
		Matambú	135.0	2176.0	27.1	5	3	1	1	1	5.0	1	1
		Puerto Carrillo	155.6	1878.0	26.4	5	2	2	1	2	26.1	3	1
		Cuanjiquí	190.0	2222.0	27.1	5	2	1	1	2	4.5	4	1
	Liberia	El Gallo	135.0	1757.0	22.6	5	3	1	1	1	25.0	4	2
		El Jobo	17.5	1450.0	25.4	6	4	1	1	1	7.5	3	2
		Juan Santamaría	35.0	1450.0	25.4	6	4	1	1	2	6.0	4	2
El Salto		125.0	1736.0	28.3	5	4	1	1	1	1.0	5	3	
Nandayure	Carmona	50.0	1780.0	27.0	5	4	1	1	2	2.0	5	1	
	San Martín	48.0	2536.0	27.0	5	3	1	1	2	9.0	2	1	
Nicoya	Buнавista	62.0	2496.0	27.1	5	3	1	1	2	21.0	3	1	
	Copal	80.0	1802.0	26.7	5	1	1	1	2	1.0	5	2	
	Garza	153.0	2880.0	26.5	5	2	1	2	1	22.9	3	1	
	Quirimán	195.0	2102.0	26.8	5	2	1	1	2	41.0	4	1	
	Varital	151.0	2176.0	27.1	5	4	1	1	1	9.0	4	1	
Puntarenas	Zapote	35.0	2052.0	27.1	5	4	1	1	1	1.0	5	1	
	Jicaral	70.0	1658.0	26.3	6	4	1	1	1	3.0	5	1	
Santa Cruz	Belen	38.0	1817.0	27.6	5	4	1	1	2	8.0	4	1	
	Sta. Rosa	60.0	1770.0	27.3	5	4	1	1	1	13.0	2	1	
	Río Tabaco	128.0	2880.0	26.5	5	3	1	1	1	15.2	2	1	
Upala	C. Agropecuario	80.0	2558.0	22.6	2	4	1	1	1	2.0	5	1	
	El Carmen	33.0	2558.0	22.6	2	4	1	1	1	2.0	5	1	
	Municipalidad	90.0	2558.0	22.6	2	4	1	1	1	2.0	5	1	

Continuación ...

Cuadro 10: Promedio por sitio de características climáticas y fisiográficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	ELEV (m)	PMA (mm)	TMA (°C)	DEFHID (# meses)	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	PEND	ASPE	VIENTO	
G. arborea	Abangares	Colorado	80.0	1702.0	26.8	3	4	1	1	1	10.0	4	2	
		La Palma	60.0	2256.0	26.8	5	4	1	1	1	2.0	5	1	
	Bagaces	La Virgen	407.5	1928.5	27.6	6	2	1	1	1	2	9.5	3	3
		G. Montezuma	454.0	2034.0	27.0	4	1	1	1	1	1	5.3	3	3
	Cañas	Tiguirusas	25.0	2256.0	26.8	5	4	1	1	1	1	3.0	5	2
		Betania	120.0	2102.0	27.0	5	4	1	1	1	2	4.0	4	1
	Hojancha	La Arena	345.0	2102.0	26.8	5	3	1	1	1	2	17.5	2	1
		La Maravilla	290.0	1810.0	26.6	6	3	1	1	1	2	15.5	5	2
	Los Angeles	Lajas	240.0	2102.0	26.3	5	3	1	2	2	2	21.5	3	2
		Matambu	320.0	2102.0	26.3	5	1	1	1	1	2	20.0	2	1
Matina	Matina	350.0	2102.0	26.3	5	2	1	1	1	2	17.5	3	2	
	Pilangosta	100.0	2102.0	26.3	5	3	1	1	1	1	16.0	2	2	
Pita Rayada	Pita Rayada	426.3	2071.0	26.3	5	3	1	1	1	2	18.0	4	2	
	El Gallo	102.5	1757.0	22.6	5	2	1	1	1	2	17.0	3	2	
Liberia	Curubande	365.0	1878.0	26.8	6	4	1	1	1	1	18.5	3	2	
	El Salto	190.0	1518.0	26.8	6	4	1	1	1	1	0.0	5	3	
Nandayure	Carmona	135.0	1780.0	27.0	5	3	1	1	1	2	17.0	4	1	
	San Pedro	90.0	2536.0	27.0	5	3	1	1	1	2	15.0	4	2	
Nicoya	Guastomatal	70.0	2232.0	27.0	6	3	1	1	1	2	13.0	2	1	
	Quiriman	210.0	2102.0	26.8	5	3	1	1	1	2	17.0	4	1	
Santa Cruz	El Socorro	245.0	1948.0	27.0	5	3	1	1	1	2	26.0	4	1	
	Potrero	55.3	1787.5	27.1	6	3	1	1	1	1	12.8	4	1	
San Juan	Río Tabaco	160.0	2880.0	26.5	5	4	1	2	2	2	12.0	3	2	
	San Juan	100.0	1872.0	27.3	5	3	1	1	2	3	42.0	4	1	

Variables del suelo

Las variables contenidas en este estudio, y la metodología empleada para su determinación, fueron las siguientes.

- pH en agua (pH), utilizando un potenciómetro, con una relación suelo-agua de 10:25
- Acidez extractable en $\text{cmol}(+)/\text{L}$ (Acdept), titulando con una solución básica (NaOH 0.01 N) y utilizando una sal neutra KCL 1N en una proporción de 2.5: 25
- Textura, empleando el método de Bouyoucos modificado. Obteniendo el Contenido porcentual de arena (Arena), el contenido porcentual limo (Limo) y el contenido porcentual arcilla (Arcilla)
- Materia orgánica, en porcentaje (MO), utilizando la metodología de Walkley y Black (1938), logrando la oxidación de la materia orgánica al usar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N, reacción catalizada por $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, obteniendo por titulación el porcentaje de carbono orgánico, debiendo ser multiplicado por un factor empírico de 1.72
- Resistencia a la penetración, en Kg / cm^2 , utilizando un penetrómetro (RES)
- Contenido de calcio y magnesio, en $\text{cmol}(+)/\text{L}$ de suelo (Ca y Mg). Utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica y una solución de KCL 1N en una proporción de 2.5:25
- Contenido de potasio, en $\text{cmol}(+)/\text{L}$ de suelo (K). Utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica y el método de Olsen Modificado en una proporción de 2.5:25
- Adición de bases, es decir la suma del contenido de calcio, magnesio y potasio (Ca+Mg+K)
- Contenido de fósforo, en mg/L de suelo (P). Utilizando el método de Olsen modificado en una proporción de 2.5:25 y la determinación colorimétrica con azul de molibdeno.

Cabe recordar, que esta investigación utiliza información de un trabajo anterior (Vásquez y Ugalde, 1994) y la generada en el transcurso de la misma. La información es semejante en cuanto a las variables recabadas; sin embargo, el muestreo a dos

profundidades (acápite 5.3.1.3), se incorporó en esta segunda oportunidad. Esto genera dos grupos de información, la relacionada a los primeros 20 cm de profundidad de suelo (referida con un valor de 1^a) y la obtenida entre los 20 y 40 cm de profundidad (referida con un valor de 2^a) Es decir, la información hasta 20 cm de profundidad, esta disponible para todas las parcelas muestreadas, en tanto solo las parcelas recientemente incorporadas, cuentan con la información a la segunda profundidad

Variables de las hojas

La muestra foliar, de las parcelas realizadas en el transcurso del presente año, fue digerida en húmedo con una mezcla nitroperclórica y sometida a un análisis foliar básico, el cual permitió obtener la siguiente variables.

- Contenido de calcio, magnesio y potasio, en porcentaje (Ca, Mg y K). Determinados en un espectrofotómetro de absorción atómica
- Contenido de fósforo, en porcentaje (P). Utilizando el método de Olsen modificado en una proporción de 2.5:25 y la determinación colorimétrica con azul de molibdeno

En el Cuadro 11, se presentan las variables edáficas y foliares para las tres especies en estudio. Por rigurosidad estadística, a las variables expresadas en porcentajes (Arena, limo, arcilla, MO y contenidos foliares de Ca, Mg, K y P), se les aplicó la transformación $\text{Arc Sen } \sqrt{x}$, al contenido de Ca, Mg, K y P del suelo, se les aplicó la transformación logarítmica

Cuadro 11: Promedio por sitio de características edáficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	pH		ACEXT		ARENA		LIMO		ARCILLA		MO		RES	Ca		Mg		K		Ca+Mg+K		P	Ca	Mg	K	P	
			1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª		1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª						1ª
			Kg/cm ²																cmol(+)/L		mg/L		%						
T. grandis	Abangares	Colorado	6.9		40	30	30	30	30	5.4		12.0	4.0		0.8		16.8												
		Bagaces	7.2	6.8	0.0	0.0	32	33	26	27	42	40	3.6	2.1	11.1	13.0	11.7	4.5	4.7	0.4	0.4	0.4	17.9	16.8	1.2	0.6	0.5	0.2	1.5
	Hojancha	P. de la Bejura	6.2		37	39	25	39				19.0	6.3		0.5		25.8												
		Betania	6.2		31	46	23	44				20.1	7.1		0.1		27.3												
		Guapinol	6.6	6.4	0.1	0.1	18	12	31	27	50	60	4.6	2.0	7.5	16.3	15.9	4.8	5.0	0.4	0.2	21.5	21.1	3.7	0.0				
		La Arena	5.8	6.5	0.1	0.2	27	25	33	30	39	44	5.3	1.7	7.1	19.6	23.2	6.9	10.6	0.1	0.0	26.6	33.8	0.3	0.0				
	La Mansión	La Mansión	6.2	6.3	0.1	0.1	26	18	31	27	42	54	4.4	1.5	3.8	17.1	19.2	7.6	8.1	0.2	0.1	24.9	27.4	4.3	1.6				
		La Vigia	6.2	6.6	0.1	0.1	20	16	33	25	47	59	6.1	1.9	4.8	25.7	27.2	7.0	8.1	0.2	0.1	32.9	35.4	3.1	0.0				
	Lajas	Lajas	6.8	7.0	0.1	0.1	22	23	32	26	45	50	3.8	1.5	6.3	26.3	28.2	9.8	12.8	0.1	0.0	36.2	41.0	0.5	0.0				
		Los Angeles	6.7	6.8	0.1	0.1	26	12	41	31	33	57	3.6	3.9	5.6	22.6	18.6	11.4	8.1	0.1	0.0	34.1	26.7	0.4	0.0				
		Matambu	5.8	6.1	0.1	0.1	34	28	23	23	43	49	6.1	2.8	7.2	13.1	14.0	4.6	5.6	0.5	0.4	18.2	20.0	5.3	0.8				
	Pilangosta	Pilangosta	6.2	6.7	0.1	0.1	28	43	41	27	32	30	5.7	1.3	4.1	16.3	14.5	5.1	5.8	0.4	0.8	21.8	21.1	5.1	9.3				
		Puerto Carrillo	6.1	6.4	0.1	0.1	20	17	33	29	46	54	3.8	1.5	5.9	15.6	15.7	6.0	7.2	0.3	0.1	21.9	23.0	0.7	0.1				
	San Rafael	San Rafael	5.8	5.8	0.1	0.1	18	6	31	27	51	67	3.0	0.9	6.5	10.3	10.3	3.6	3.9	0.0	0.0	13.9	14.2	0.2	0.0				
		Santa Marta	6.4	6.5	0.1	0.1	15	22	31	27	54	52	2.0	1.2	6.5	19.5	18.8	5.2	6.1	0.1	0.0	24.8	24.9	0.3	0.3				
	Liberia	Curubande	5.6		34	43	23	23	6.9			7.5	2.0		10.2														
		El Salto	5.9		50	32	18	2.4				3.1	1.1		4.6														
Nandayure	Acoyada	5.7		51	19	30	4.2				30.6	10.8		0.4		41.8													
	Punta Coyote	6.5	6.7	0.1	0.1	23	25	31	27	46	47	4.1	2.2	6.9	24.1	23.8	6.6	7.1	0.1	0.1	30.8	31.0	8.6	5.5					
	Zapotal	6.1		29	37	34	5.9				10.5	4.2		0.2		14.9													
Nicoya	Buenavista	6.4		23	41	36	4.0				31.0	7.0		0.4		38.4													
	Garza	6.2	6.6	0.1	0.1	28	26	33	31	39	44	4.4	2.0	11.5	27.5	31.8	5.6	6.1	0.4	0.3	33.5	38.2	6.4	4.1	1.0	0.3	1.7	0.3	
	Mansión	6.5		53	23	24	4.8				27.1	7.1		0.6		34.8													
Q. Honda	Q. Honda	7.1	7.1	0.1	0.1	22	23	35	28	43	48	3.3	2.4	6.3	33.7	30.2	4.1	3.7	0.2	0.1	38.0	34.0	1.1	0.1					
	Dominical	5.3	5.2	1.8	1.8	10	15	24	25	66	60	3.1	1.0	7.1	17.4	11.3	4.3	2.9	0.3	0.3	22.0	14.5	1.7	2.0					
P. Zeledon	Barú	5.3	5.6	0.6	0.3	15	37	32	30	53	33	2.5	1.3	9.6	45.5	48.5	5.1	3.9	0.6	0.9	51.2	53.3	4.4	11.2					
	Río Tabaco	5.9	6.3	0.1	0.1	28	21	35	32	37	47	4.6	2.3	14.8	20.0	22.4	6.5	7.9	0.3	0.3	26.8	30.6	2.2	2.0	1.1	0.3	1.6	0.3	
Santa Cruz	San Juan	6.2		29	34	37	8.6				4.0	5.0		1.0		10.0													

Continuación ...

Cuadro 11: Promedio por sitio de características edáficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie	Cantón	Localización del sitio	pH		ACDEXT		ARENA		LIMO		ARCILLA		MO		RES	Kg/cm ²	Ca		Mg		Ca+Mg+K		P	Ca	Mg	K	P	1ª	2ª					
			1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª			1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª								1ª	2ª	1ª	2ª	
B. <i>quimatum</i>	Bagaces	San Pedro	6.2		20	24	24	56	5.1						10.0															14.0		0.9		
	Cañas	G. Montezuma	5.8		38	30	30	32	6.1						9.1														13.1		0.9			
		Javilla	6.4		44	38	38	19	5.2						9.0														14.0		1.0			
		La Pacifica	6.2		40	28	40	32	4.6						8.0														10.6		0.5			
	Hojancha	Estrada Rávago	6.1		25	45	45	30	5.9						17.0														25.4		0.3			
		La Ceiba	6.0		21	55	24	24	9.7						20.1														27.4		7.0			
		Matambú	5.7		32	40	40	28	6.0						29.0														39.2		0.2			
		Puerto Carillo	6.1	6.5	0.1	0.0	19	29	26	51	58	5.0	1.7	8.8	21.6	23.0	7.9	11.0	0.1	0.0	29.6	34.0	0.5	0.0										
	La Cruz	Guanajiquí	6.6		26	43	43	32	4.4						8.0														11.3		0.8			
		El Gallo	5.5		24	44	44	32	6.0						20.0														26.3		0.3			
		El Jobo	6.2		36	34	34	30	4.3						19.0														25.2		0.7			
		J. Santamaría	6.7		38	32	30	30	9.1						22.1														29.5		1.3			
	Liberia	El Salto	6.7		60	30	10	4.0							2.1													4.6		0.5				
	Nandayure	Carmona	6.5		27	41	32	3.5							17.0														23.4		0.4			
		San Martín	5.9		23	45	32	4.3							9.0														12.2		0.1			
	Nicoya	Buenavista	6.5		25	39	36	4.3							30.1														38.4		0.2			
		Copal	6.4	6.7	0.1	0.1	25	17	29	31	46	5.0	3.5	5.8	20.0	21.7	9.2	14.9	0.1	0.1	29.3	36.7	4.9	2.7										
		Garza	6.7	7.0	0.1	0.1	26	30	33	31	41	3.6	1.8	9.9	26.9	31.2	4.5	3.9	0.3	0.2	31.7	35.3	6.2	3.8	1.0	0.3	1.1	0.3						
		Quirimán	6.3		27	47	26	5.4							28.0														37.6		0.5			
		Varillal	6.1		48	30	22	10							19.1														30.7		0.5			
		Zapote	6.5		40	44	16	8.0							11.1														19.4		0.3			
	Puntarenas	Jicaral	5.8		33	39	27	3.8							31.9														42.6		1.2			
	Santa Cruz	Belen	6.0		24	50	26	8.0							26.1														33.4		0.2			
		Sta. Rosa	6.4		19	45	36	4.3							18.0														27.2		0.2			
		Río Tabaco	5.9	6.3	0.1	0.1	30	37	33	28	38	4.7	2.2	13.0	18.3	20.9	5.6	7.0	0.5	0.5	24.4	28.4	9.3	3.9	1.1	0.4	1.1	0.2						
	Upala	C. Agropecuario	5.3		17	37	46	2.3							10.0														13.5		0.2			
		El Carmen	5.0		19	47	34	4.7							28.1														40.7		0.2			
		Municipalidad	5.0		29	37	33	2.7							18.5														24.5		0.8			

Continuación ...

Cuadro 11: Promedio por sitio de características edáficas de las parcelas utilizadas en el estudio, según especie, cantón y localización del sitio.

Especie arborea	Cantón	Localización del sitio	pH		ACDEXT		ARENA		LIMO		ARCILLA		MO		RES Kg/cm ²	Ca		Mg		K		Ca+Mg+K		P mg/L	Ca Mg K P (%) Foliar				
			1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª		1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª						
			(%)																										
G	Abangares	Colorado	6.9		47	24	29	8.2								33.1	9.6	1.5	1.5			44.2							
	La Palma		6.2		47	24	29	7.8							10.1	2.1	0.3	0.3			12.5								
	La Virgen		5.7		42	28	30	3.6							6.0	1.1	0.5	0.5			7.6								
	G. Montezuma		5.6		42	25	33	6.8							7.0	2.4	0.4	0.4			9.8								
	Tiquiruses		6.3		45	28	27	4.0							12.0	3.1	0.5	0.5			15.6								
Hojancha	Betania		6.4		34	44	22	4.6							6.1	4.1	0.4	0.4			10.6								
	La Arena		5.9		25	41	34	7.5							8.6	4.1	0.2	0.2			12.9								
	La Maravilla		6.1		31	42	28	6.1							7.1	2.1	0.3	0.3			9.5								
	Lajas		6.7	0.1	0.2	14	13	38	36	48	51	3.1	1.2	7.8	25.2	27.2	11.0	13.3	0.0	0.0	0.2	36.2	40.5	0.0					
	Los Angeles		6.1	6.5	0.1	0.1	26	12	34	26	41	63	7.1	2.7	6.8	20.5	20.9	7.0	9.4	0.0	0.0	0.8	27.5	30.3	0.0				
	Matambu		6.6	6.8	0.1	0.1	23	27	33	29	45	45	3.3	1.5	5.3	26.6	29.0	13.2	15.8	0.0	0.0	0.2	39.8	44.8	0.0				
	Matina		6.0	6.1	0.1	0.1	26	20	27	25	46	54	6.5	2.2	5.5	27.6	26.2	6.0	6.3	0.1	0.0	1.0	33.7	32.5	0.0				
	Pilangosta		6.3	6.7	0.1	0.1	23	28	33	29	44	42	4.5	1.2	6.0	16.2	22.3	8.4	12.9	0.1	0.1	0.2	24.7	35.3	0.0				
	Pilangosta		6.2	6.8	0.1	0.2	24	27	34	30	44	44	4.7	1.4	5.3	17.8	27.2	9.2	15.4	0.2	0.0	0.3	27.2	42.6	0.0				
	Pita Rayada		6.3	6.6	0.1	0.1	23	23	31	27	45	49	6.2	2.7	5.8	22.5	27.1	7.5	10.6	0.1	0.0	0.8	30.1	37.7	0.5				
La Cruz	El Gallo		6.1		35	35	30	6.5							22.0	6.5	0.6	0.6			29.1								
Liberta	Curubande		5.4		44	34	22	8.0							9.1	2.0	0.7	0.7			11.8								
	El Salto		6.6		44	36	20	2.8							3.1	1.1	0.3	0.3			4.5								
Nandayure	Carmona		6.0		31	45	24	7.2							18.0	6.0	0.2	0.2			24.2								
	San. Pedro		6.2		43	36	21	5.9							19.0	9.1	0.4	0.4			28.5								
Nicoya	Guastomatal		6.6		23	49	28	7.2							21.1	9.1	0.4	0.4			30.6								
	Quiriman		6.3		57	19	24	4.3							10.0	8.1	0.2	0.2			18.3								
Santa Cruz	El Socorro		6.2		31	35	24	4.8							13.0	5.0	0.1	0.1			18.1								
	Potero		6.1		36	43	22	6.2							24.3	9.5	0.1	0.1			33.9								
	Río Tabaco		6.4	6.5	0.1	0.1	30	24	29	27	41	49	9.2	2.7	8.0	28.7	19.2	8.0	9.2	0.3	0.2	4.7	37.0	28.6	1.9	1.5	0.4	1.7	0.3
	San Juan		6.4		58	16	26	4.8							28.0	7.0	0.7	0.7			35.7								

5.3.2. Labores de Oficina

La etapa de oficina contempló las siguientes actividades

5.3.2.1. Generación y depuración de base de datos

Para cada especie contenida en el estudio, se generó una base de datos, la cual contenía toda la información generada en la etapa de campo.

La depuración de la base de datos, en base al análisis gráfico, permitió eliminar aquellos datos dudosos o no representativos de las condiciones generales presentes y detectar tendencias entre las variables.

5.3.2.2. Determinación del índice de sitio

Esta base de datos, estuvo contenida por la totalidad de parcelas que este estudio contempla (Cuadro 7), utilizando para ello información de parcelas temporales y permanentes de medición. El modelo de predicción del índice de sitio, está basado en el modelo de Shumacher (1939, citado por Alder, 1980), es cual es como sigue:

$$\text{Ln}(H_{\text{dom}}) = a + b \frac{1}{E^k}$$

Donde:	H _{dom}	=	Altura dominante	
	a	=	Intercepto	; 2 ≤ a ≤ 7
	b	=	Pendiente	; b < 0
	k	=	Exponente	; 0.2 ≤ k ≤ 2
	E	=	Edad del rodal	
	Ln	=	Logaritmo natural	

El exponente "k", se determinó mediante el método no lineal (NOLIN) del programa Statgraphics 6.0.

A partir de modelo Shumacher, para cada especie se desarrolló un modelo anamórfico y otro polimórfico, siendo los siguientes:

Modelo anamórfico:
$$\text{Ln}(\text{IS}) = \text{Ln}(\text{Hdom}) + b \left(\frac{1}{E_0^k} - \frac{1}{E^k} \right)$$

Modelo polimórfico:
$$\text{Ln}(\text{IS}) = a - (a - \text{Ln}(\text{Hdom})) \left(\frac{E}{E_0} \right)^k$$

Donde:

- IS = Índice de sitio
- Hdom = Altura dominante
- a = Intercepto
- b = Pendiente
- E₀ = Edad base seleccionada, en este caso 10 años
- E = Edad del rodal
- k = Exponente
- Ln = Logaritmo natural

Para decidir que tipo de modelo se usaría, se empleó el error cuadrático medio, el cual está definido por la siguiente expresión:

$$\text{ECM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{H dom observada} - \text{H dom estimada})^2}{n - 2}}$$

Por especie, a cada modelo seleccionado, se le realizó una comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados (Cuadro 12), los cuales han sido descritos por Gujarati (1993).

Cuadro 12: Supuestos del método de los mínimos cuadrados y pruebas estadísticas aplicadas en cada caso, según Gujarati (1993).

	Supuesto	Prueba utilizada
1.	El valor promedio condicional del término de perturbación poblacional μ_i , condicionado en los valores dados de la variable explicativa, es igual a cero	t-Student
2.	La varianza condicional de μ_i es homocedástica	Bartlett
3.	Las μ poseen una distribución normal cuyo promedio y varian-za están dados por los supuestos 1 y 2	Kolmogorov Smirnov
4.	No existe autocorrelación alguna entre las perturbaciones	Durbin-Watson
5.	No existe multicolinealidad entre las variables explicativas	Significancia estadística de F y t

Posteriormente, se diferenciaron cinco clases de sitio a partir de la información del índice de sitio promedio (Curva Guía), siendo las siguientes:

- Clase de sitio Marginal, aquellos sitios con un índice de sitio igual o inferior al percentil 12.5. Estos sitios presentan serios problemas para el establecimiento de las especies comerciales y su utilización requerirá múltiples labores de preparación de sitio. Representa el 12.5% de la información.
- Clase de sitio Baja, aquellos sitios con un índice de sitio comprendido entre el percentil 12.5 y el percentil 37.5. Sitios poco productivos y de dudosa recomendación. Representa el 25% de la información.
- Clase de sitio Media, aquellos sitios con un índice de sitio que varía entre el percentil 37.5 y el percentil 62.5. Sitios que dependiendo del manejo podrían ser productivos. Representa el 25% de la información.
- Clase de sitio Alta, aquellos sitios con un índice de sitio superior al percentil 62.5, pero inferior al percentil 87.5. Sitios con un buen potencial productivo. Representa el 12.5% de la información.
- Clase de sitio Excelente, aquellos sitios con un índice de sitio superior al percentil 90. Sitios con las mejores expectativas de productividad. Representa el 10% de la información.

La clase marginal y excelente representan en conjunto el 25% de la información, el restante 75% fue asociado en igual proporción a las restantes tres clases de productividad.

5.3.2.3. Determinación de la productividad

Se determinó la productividad para cada especie en estudio y ésta fue clasificada en base al incremento medio anual en área basal (IMA-G), de manera análoga a lo realizado en el IS, presentándose las mismas cinco clases, pero en este caso clases de productividad. En forma simultánea se caracterizó el crecimiento y productividad de los sitios en términos de IMA en Dap, IMA en altura e IMA en volúmenes.

5.3.2.4. Relación del índice de sitio con variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares.

Para relacionar el índice de sitio con las variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares, se utilizó el 80% de la información que disponía de tales variables (Cuadro 7), el restante 20% conformó la base de datos de validación.

La relación se estableció al generar matrices de correlación entre el índice de sitio y cada grupo de variables medidas (fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares). El objetivo fue vislumbrar las variables que presenten una mejor correlación lineal e inferir una relación causal entre estas variables.

Se obtuvo un modelo general para cada especie, es decir que incorporaba información fisiográfica y/o edáfica y/o climáticas y/o foliares (a la primera profundidad y a las dos profundidades en conjunto si se presentaba una relación estadísticamente significativa), el cual fue desarrollado a través del procedimiento estadístico Stepwise. Fueron excluidas del análisis para obtener el modelo general, las variables que no hayan presentado una correlación satisfactoria con el índice de sitio por separado. Por especie, a cada modelo seleccionado, se le realizó una comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados (Cuadro 12).

5.3.2.5. Validación de los modelos

La validación de los modelos, fue hecha utilizando la base de datos de validación (Cuadro 7). En este proceso se utilizó la metodología descrita por Freese (1960) y Vallejos (1979), (Cuadro 5 y Cuadro 6) para una precisión en la estimación de un 20%.

5.3.2.6. Análisis foliar

Se relacionó el contenido foliar con el índice de sitio y variables edáficas, obteniendo las matrices de correlación respectivas, para vislumbrar relaciones causales entre las variables y de este modo conocer la influencia de una parte del ciclaje de nutrientes en

la productividad de las plantaciones bajo estudio. Se obtuvo un modelo para cada relación estadísticamente significativas ($P < 0.05$)

Esta sección se desarrolló, en las fincas Garza, Río Tabaco y Bagaces.

5.3.2.7. Ensayo de introducción de especies

De manera complementaria se analizó un ensayo de siete años de introducción de especies de *T. grandis*, con el objeto de determinar la mejor procedencia y así dar una recomendación para futuras reforestaciones en la zona que comprendió este estudio.

El ensayo estaba ubicado en el pueblo Barra Honda del cantón Nicoya, a 65 msnm y un total de seis procedencias fueron analizadas, las cuales fueron:

- Paquera, Costa Rica
- Quepos, Costa Rica
- Quebrada Negra, Panamá
- Zam BAH, Tailandia
- ZIC SPA1, Tailandia
- El Salvador.

El diseño muestral aplicado fue bloques aleatorios incompletos con tres repeticiones, con parcelas de 6 por 6 árboles, dejándose dos hileras para evitar el efecto de borde, lo que origina una parcela de medición de 4 por 4 árboles (16 árboles en total). Las variables analizadas, a los 16 árboles de la parcela, fueron incremento medio anual en diámetro, altura y volumen total, utilizando análisis de varianza y la prueba de comparaciones múltiples de Student - Newman- Keuls (SNK).

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. Obtención del modelo de índice de sitio

En el Cuadro 13 y Cuadro 14, aparece el resumen de los modelos seleccionados para las especies en estudio; mientras, en el Cuadro 1a del anexo, se muestran los resultados en forma detallada.

Según la información proporcionada en el Cuadro 13, las tres especies presentan una dependencia lineal altamente significativa ($p < 0.01$) entre la edad y el índice de sitio. También en todos los casos, tanto el intercepto como la pendiente resultaron ser altamente significativos ($p < 0.01$). Esto sugiere que los modelos podrán ser usados en la estimación del índice de sitio, para los sitios en estudio.

Cuadro 13: Resumen de los modelos de índice de sitio, según especie

Estadígrafos	Especies		
	<i>T. grandis</i>	<i>B. quinatum</i>	<i>G. arborea</i>
Coefficiente K	0.5162	0.2391	0.6533
Valor F	607.30 **	842.27 **	26.10 **
Intercepto	3.4723 **	5.4043 **	3.3353 **
Coefficiente de regresión	-1.8253 **	-5.1101 **	-1.5830 **
Coefficiente de correlación	0.6911 **	0.8567 **	0.5399 **
Coefficiente de determinación	0.478	0.734	0.292
Error estándar de estimación (m)	1.2080	1.3046	1.4090
Cantidad de observaciones	664	306	62

** = Altamente significativo, a un nivel de significancia de 1% ($p < 0.01$)

Note que la cantidad de observaciones, no coincide con el tamaño muestral señalado para cada especie (Cuadro 7), esto se debe a que en algunas situaciones una parcela tenía dos mediciones consecutivas, lo cual amplió el tamaño muestral.

La comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los tres modelos seleccionados, es posible observarlo en el Cuadro 14, donde se establece que todos los modelos cumplen con los supuestos requeridos. Esto ratifica lo señalado con

anterioridad, en cuanto a la utilización, por parte de los usuarios, de estos modelos para la zona en estudio.

Cuadro 14: Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos seleccionados.

Supuesto (Prueba utilizada)	Especies		
	<i>T. grandis</i>	<i>B. quinatum</i>	<i>G. arborea</i>
Media de los residuos igual a cero (t)	-2.65E-13 **	4.73E-14 **	-8.98E-15 **
Homogeneidad de varianza (Bartlett)	16.110 **	18.503 **	17.591 **
Normalidad de los residuos (Kolmogorov S)	0.068 **	0.056 **	0.213 *
Autocorrelación residuos (Durbin Watson)	1.928 **	1.903 **	1.930 **

** = Altamente significativo, a un nivel de significancia de 1% ($p < 0.01$)

* = Significativo estadísticamente, a un nivel de significancia de 5% ($p < 0.05$)

El empleo del error cuadrático medio (Cuadro 15), permitió seleccionar para cada especie, un modelo ya sea anamórfico o polimórfico, que mejor representara la condiciones particulares de este estudio. Se seleccionó el modelo que presentó el menor error cuadrático medio, a pesar de que la diferencia entre dichos modelos, por lo general es mínima⁴, cuando ambos tienen buena predicción.

Cuadro 15: Resultado de la aplicación del error cuadrático medio, según especie y modelo

Especie	Modelo anamórfico	Modelo Polimórfico
<i>T. grandis</i>	2.7619713 *	2.7619726
<i>B. quinatum</i>	1.9736602 *	1.9736605
<i>G. arborea</i>	5.1301895 *	5.1301925

* = menor ECM, modelo seleccionado

⁴ UGALDE, L. 1996. Selección de modelos de índice de sitio. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Comunicación personal.

Por lo tanto, la expresión del modelo para cada especie, resultó ser:

T. grandis

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.8253 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.5162}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.5162}} \right)$$

B. quinatum

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 5.1101 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.2361}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.2361}} \right)$$

G. arborea

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.5830 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.6533}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.6533}} \right)$$

En base a los modelos descritos anteriormente y a lo indicado en el acápite 5.3.2.2., se definieron cinco clases de sitio, cuya información resumida se presenta en el Cuadro 16 y su representación gráfica en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7.

En el estudio desarrollado por Vásquez y Ugalde (1994), definieron tres clases de sitio, pero en este caso se prefirió definir un mayor número, ya que se abarcó, al menos en *T. grandis*, gran parte del rango de dispersión, en términos de crecimiento, de la especie en Costa Rica.

Cuadro 16: Clasificación de las parcelas, según especie bajo cinco clases de índice de sitio, a una edad base de 10 años.

Clase de Sitio	Especies					
	<i>T. grandis</i>		<i>B. quinatum</i>		<i>G. arborea</i>	
	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)
Marginal	≤ 13.34	≤ 1.33	≤ 7.79	≤ 0.77	≤ 12.10	≤ 1.21
Bajo	13.35 - 17.40	1.34 - 1.74	7.80 - 10.91	0.78 - 1.09	12.11 - 20.92	1.22 - 2.09
Medio	17.41 - 19.85	1.75 - 1.99	10.92 - 13.00	1.10 - 1.30	20.93 - 22.67	2.10 - 2.27
Alto	19.86 - 22.87	2.00 - 2.28	13.01 - 15.77	1.31 - 1.57	22.68 - 27.79	2.28 - 2.77
Excelente	≥ 22.88	≥ 2.29	≥ 15.78	≥ 1.58	≥ 27.80	≥ 2.78

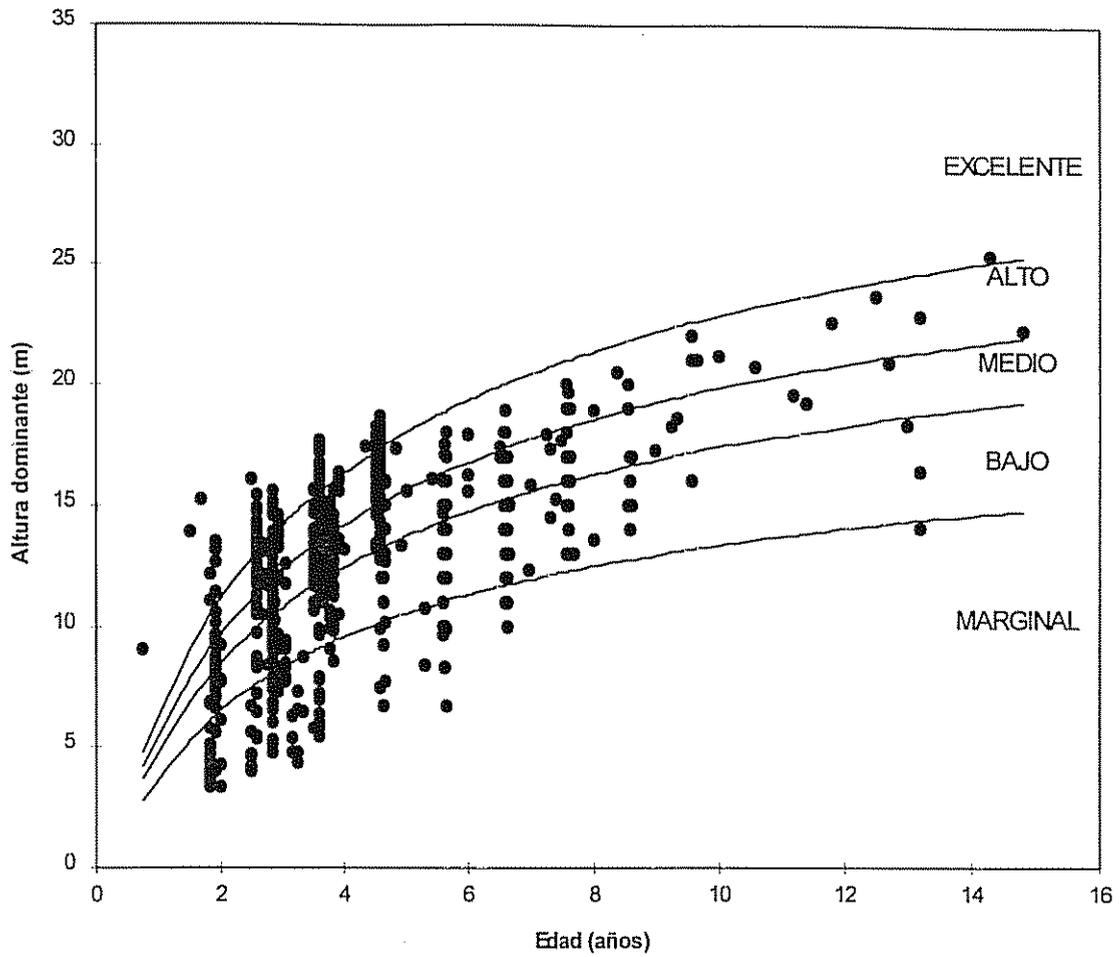


Figura 5: Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de *T. grandis*, contempladas en este estudio.

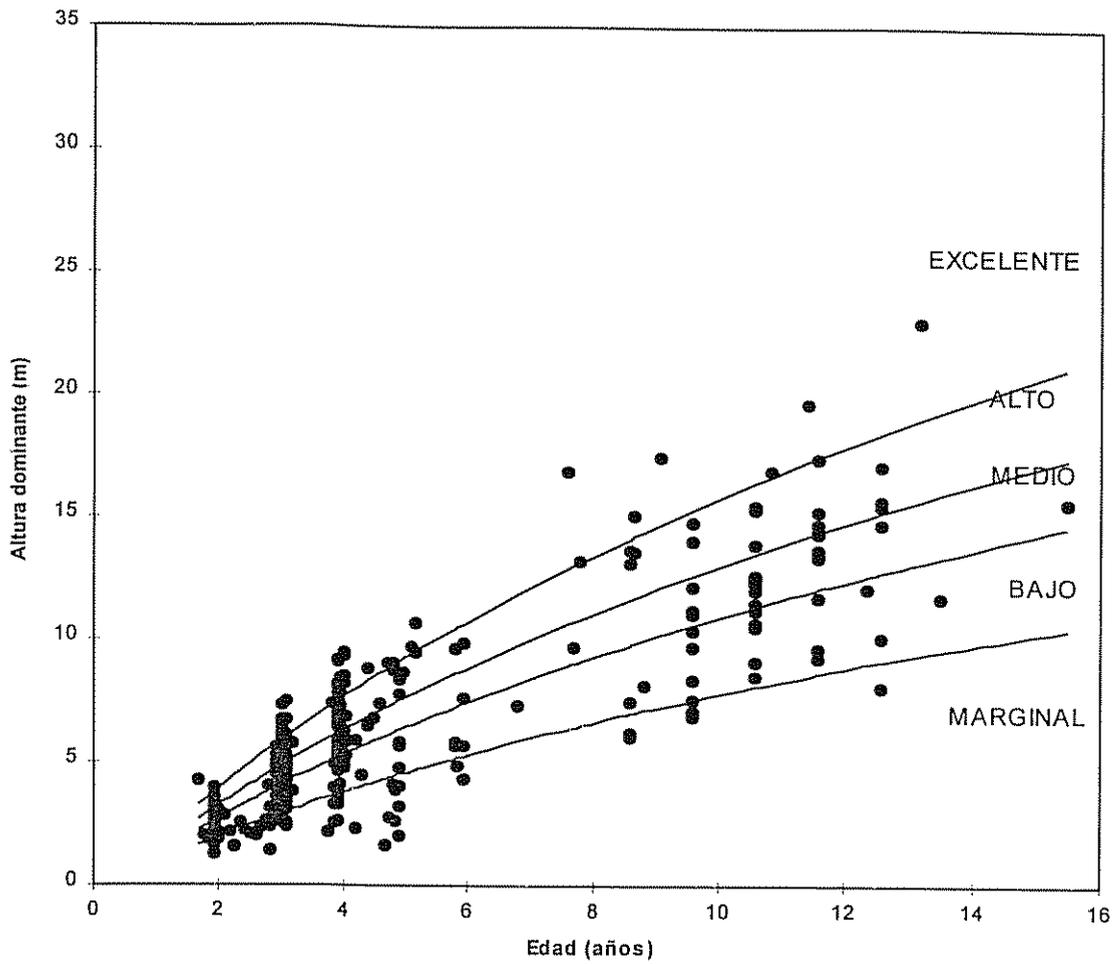


Figura 6: Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de *B. quinatum*, contempladas en este estudio.

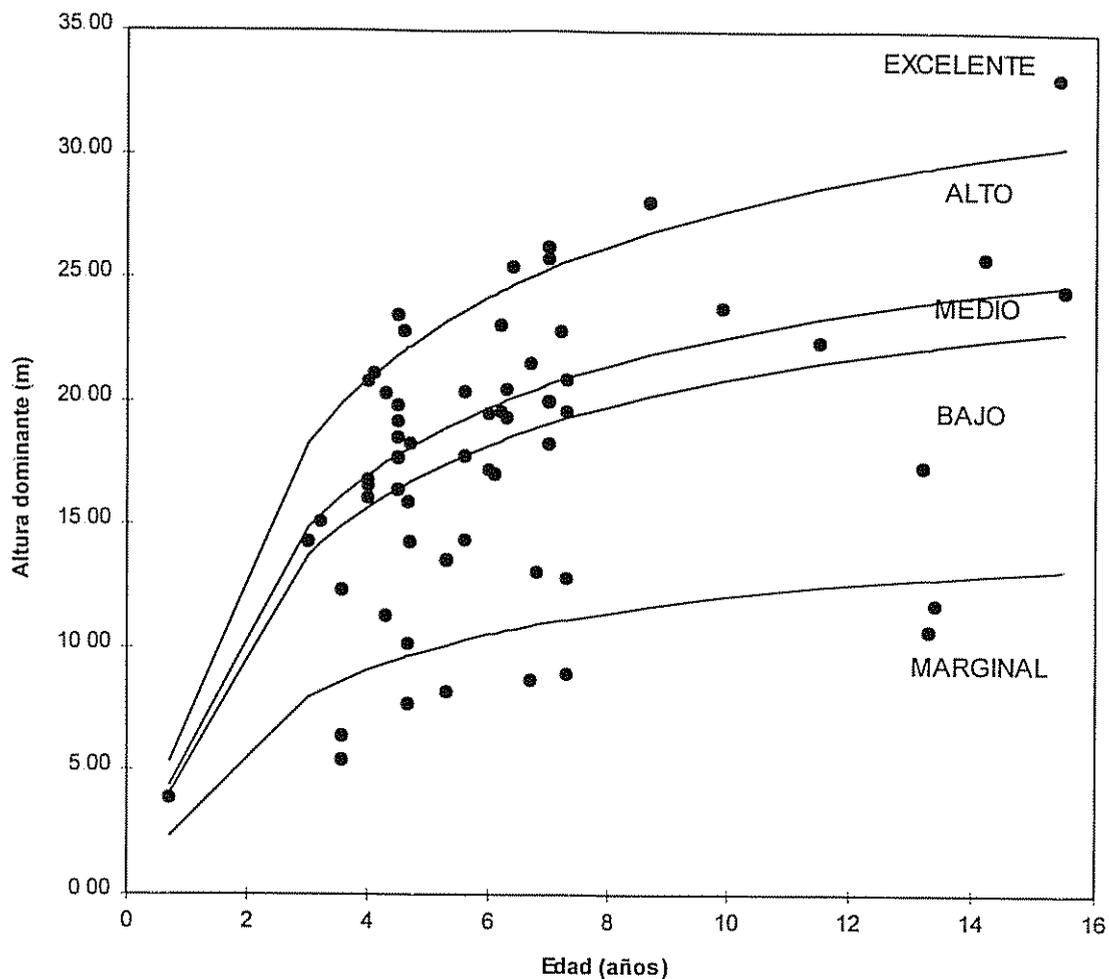


Figura 7: Ubicación en las cinco clases de sitio, de la totalidad de parcelas de *G. arborea*, contempladas en este estudio.

De las figuras anteriores y del Cuadro 16, se desprende que los mayores incrementos promedios en altura dominante los experimenta *G. arborea*, seguida de *T. grandis* y por último *B. quinatum*, lo cual coincide con lo determinado por Vázquez y Ugalde (1994).

Para la identificación de cantones y lotes dentro de un sitio (al relacionarlo con los resultados del Cuadro 9) que presentaron los menores (Marginal) y mayores (Excelente) índices de sitio, se caracterizó el índice de sitio de las tres especies (Cuadro 17).

Cuadro 17: Número de parcelas y promedio del índice de sitio según clase de sitio, cantón y especie

		Número de parcelas																	
		B. quinatum					G. arborea												
Cantón	Parcelas por Cantón	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas por Cantón	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas por Cantón	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	
Abangares	2			2		1	1					1	5			2	2		1
Bagaces	16	13		2	1		1		1				2						2
Cañas							7	1	3	3			5						3
Hojancha	128	10	62	42	13	1	30	4	7	10	7	2	26	1	7	7	6		5
La Cruz							4		1	2		1	2						2
Liberia	3	2	1				1	1					3						3
Nandayure	201	10	26	42	79	44	2				2		2			1			1
Nicoya	24	12	7	3	2		111	8	27	27	33	16	2			1			1
Osa	2		1	1															
P. Zeledon	1			1															
Puntarenas							1					1							
San Carlos	5		1	1	3														
Santa Cruz	8	5	3				24	10	5	5	3	1	9	2	3	1	2		1
Upala							3		1			2	3		1		2		
Promedio del índice de sitio (m)																			
T. grandis																			
Cantón		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	
Abangares		9.50		19.38	19.29	21.26	19.07						19.07	9.31		21.45	23.13	28.10	
Bagaces								10.48											
Cañas								4.54	8.73	11.56				12.76			23.12		
Hojancha		12.88	16.86	19.52	21.62	23.49	18.43	7.36	9.87	12.24	14.55	18.43	11.39	19.66	21.22	22.79	27.55		
La Cruz								8.70	12.48			16.67					23.88		
Liberia		11.85	15.23					7.22						16.25					
Nandayure		10.50	16.97	19.75	22.25	24.25	17.47				14.28					21.35		25.27	
Nicoya		13.05	15.90	19.83	21.95			7.21	9.97	12.00	14.74	17.47				21.62	21.92		
Osa			15.15	20.29															
P. Zeledon				18.90															
Puntarenas												17.88							
San Carlos			18.09	20.40	22.15														
Santa Cruz		11.92	17.35				16.73	5.23	9.48	12.36	14.98	16.73	13.97	18.76	21.59	23.15	26.05		
Upala							17.36	9.70					19.84	20.92					

Puede observarse en las tres especies, que los cantones que presentan el mayor número de lotes clasificados como Excelentes, muestran igual comportamiento en lotes clasificados como Altos, lo cual señala la mayor potencialidad promedio de esos cantones para la reforestación.

Para *T. grandis*, el cantón de Nandayure presenta sitios clasificados como Excelentes, con un índice de sitio promedio de 24.25 m. Los sitios de Moravia y Punta Coyote, exhiben lotes dentro de esta clasificación, también el cantón de Hojancha presenta lotes dentro del sitio Lajas y Pilangosta (índice de sitio promedio de 23.49) clasificado como Excelente. Por otra parte, el mayor número de lotes clasificados como Marginales corresponden a los cantones de Bagaces (sitio Bagaces, con un índice de sitio promedio de 9.50 m), Hojancha (lotes del sitio Puerto Carrillo, con un índice de sitio promedio de 12.88 m), Nandayure (Lotes de los sitios Moravia y Punta Coyote, con un índice de sitio promedio de 10.50 m) y Nicoya (parcelas del sitio Garza, con un índice de sitio promedio de 13.05 m).

Para *B. quinatum*, el mayor número de lotes clasificados como Excelentes, con un índice de sitio promedio de 17.47 m, corresponde al cantón de Nicoya (lotes del sitio Garza). A su vez, los mayores porcentajes de sitios clasificados como Marginales corresponden a los cantones de Hojancha (lotes del sitio Puerto Carrillo, con un índice de sitio promedio de 7.36 m), Nicoya (parcelas del sitio Garza, con un índice de sitio promedio de 7.21 m) y Santa Cruz (parcelas del sitio Río Tabaco, con un índice de sitio promedio de 5.23 m).

Para *G. arborea*, el mayor número de porcentaje de lotes clasificados como Excelentes, con un índice de sitio promedio de 27.55 m, corresponde al cantón de Hojancha (parcelas de los sitios Bajo Beneficio, Betania y Pilangosta). Por su parte, los mayores porcentajes de lotes clasificados como Marginales corresponden a los cantones de Bagaces (lotes del sitio La Virgen, con un índice de sitio promedio de 9.31 m) y Cañas (parcelas del sitio Ganadería Montezuma, con un índice de sitio promedio de 12.76 m).

Para *T. grandis*, los sitios que pertenecían a zonas de vida húmedas (Santa Rosa, del Cantón San Carlos, Dominical del cantón Osa y Barú del cantón Pérez Zeledon),

presentaron lotes clasificados desde Bajos a Altos, con un índice de sitio promedio que variaba desde 15.15 a 22.15 m

6.2. Productividad

En este acápite, se describe el comportamiento de la especie bajo estudio en términos del crecimiento y productividad, con el objeto de complementar la clasificación hecha en término del índice de sitio. La información resumida del Cuadro 9 se presenta en el Cuadro 18.

Cuadro 18: Resumen de las estadísticas descriptivas de las variables dasométricas analizadas, según especie

Variable	Especies								
	<i>T. grandis</i>			<i>B. quinatum</i>			<i>G. arborea</i>		
	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo
Edad (años)	2	5	15	3	6	16	1	6	16
N1 (arb/ha)	779	1108	2500	400	754	2500	714	1324	2500
N2 (arb/ha)	300	850	2244	183	572	2068	233	772	2397
Dap (cm)	2.73	12.87	25.93	1.10	10.54	28.90	3.90	18.09	30.80
H (m)	2.36	12.62	22.50	1.13	6.03	19.60	2.80	14.93	27.90
Hdom (m)	4.20	14.24	25.40	1.64	7.28	23.00	4.00	18.03	33.00
IS (m)	6.75	19.04	34.93	2.92	12.13	20.64	8.78	20.66	34.92
G (m ² /ha)	0.53	11.46	36.11	0.04	6.94	39.56	2.25	16.74	51.27
V1 (m ³ /ha)	0.58	75.04	327.20	0.00	31.40	356.60	2.90	127.18	443.35
V2 (m ³ /ha)	33.17	95.47	245.45	36.3	102.1	253.55	11.06	73.57	228.69
IMA-Dap (cm/año)	0.80	2.81	7.65	0.24	2.02	4.08	0.90	3.24	5.60
IMA-H (m/año)	0.64	2.82	8.41	0.24	1.14	2.05	0.60	2.67	4.40
IMA-G (m ² /ha/año)	0.19	2.40	6.96	0.01	1.07	5.07	0.62	3.03	8.06
IMA-V1 (m ³ /ha/año)	0.20	15.02	43.98	0.00	4.00	27.00	2.78	20.56	52.77
IMA-V2 (m ³ /ha/año)	4.85	16.89	31.24	0.00	9.2	23.50	1.90	12.30	30.00

Donde: Edad	= Edad de la plantación en años
N1	= Número de árboles originales por hectárea
N2	= Número de árboles vivos por hectárea
Dap	= Diámetro a 1.3 m, en cm
H	= Altura total en m
Hdom	= Altura dominante en m
IS	= Índice de sitio a los 10 años
G	= Área basal, en metros cuadrados por hectárea
V1	= Volumen total con corteza, en m ³ por hectárea
V2	= Volumen en m ³ por hectárea, según fórmula correspondiente
IMA-Dap	= Incremento medio anual en Dap, expresado en cm/año
IMA-H	= Incremento medio anual en altura, expresado en m/año
IMA-G	= Incremento medio anual en área basal, expresado en m ² /ha/año

IMA-V1 = Incremento medio anual en volumen, expresado en $m^3 /ha/año$
IMA-V2 = Incremento medio anual en volumen, expresado en $m^3 /ha/año$

Debido a que V2 representa el volumen comercial de cada especie, se esperaría obtener valores inferiores al volumen total (V1), esto se presenta al comparar los valores máximos; sin embargo, lo contrario ocurre al contrastar el valor mínimo y promedio. La explicación de esta situación radica, en que algunos sitios presentan valores promedios de diámetro y altura inferiores a los rangos que los autores utilizaron para la construcción de los modelos de volumen comercial.

Para *T. grandis* (Figura 8) observamos que a la gran mayoría de los sitios inferiores a cuatro años, no fue posible calcularles su volumen comercial, por las reducidas dimensiones en diámetro y altura que exhibían.

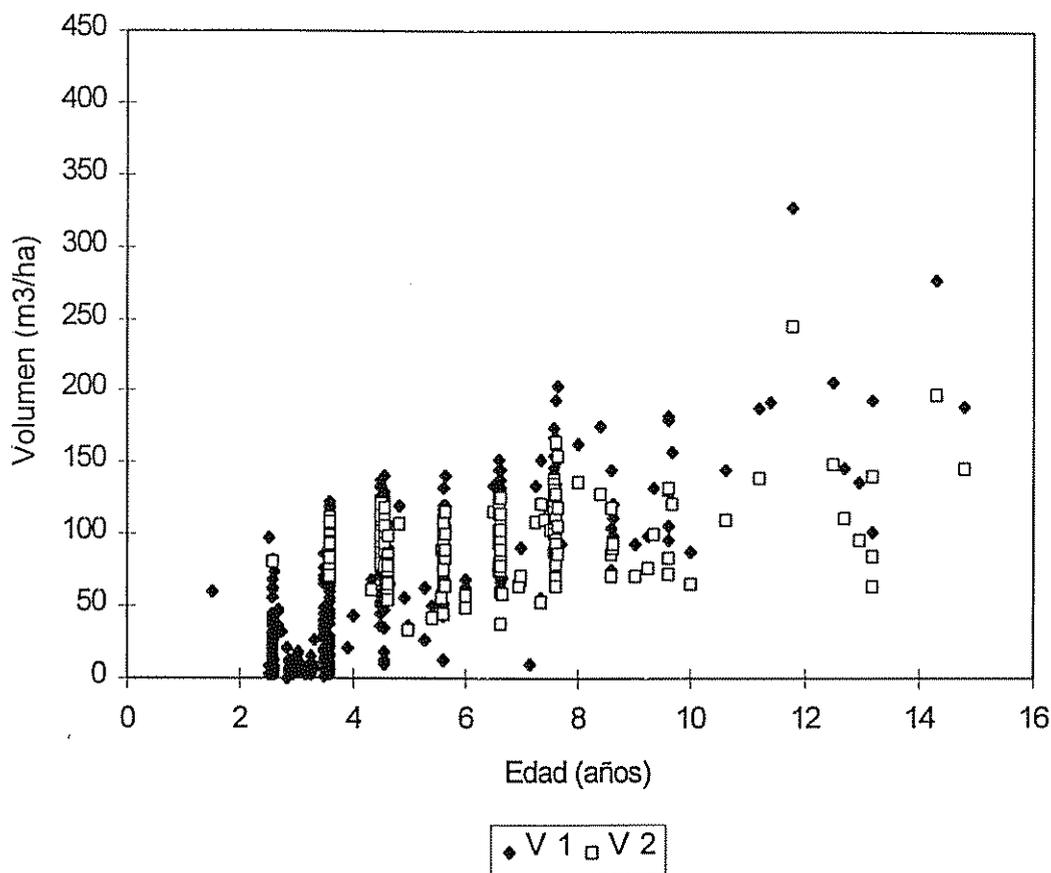


Figura 8: Volumen total (V1) y comercial (V2) de la totalidad de parcelas de *T. grandis*

Para *B. quinatum* (Figura 9), se presenta un aumento de la edad, 10 años aproximadamente, a partir de la cual se obtiene volumen comercial, esto denota las exiguas dimensiones de los sitios considerados en el presente estudio. Dimensiones que no estaban contempladas en el rango de construcción de la función de volumen comercial para dicha especie.

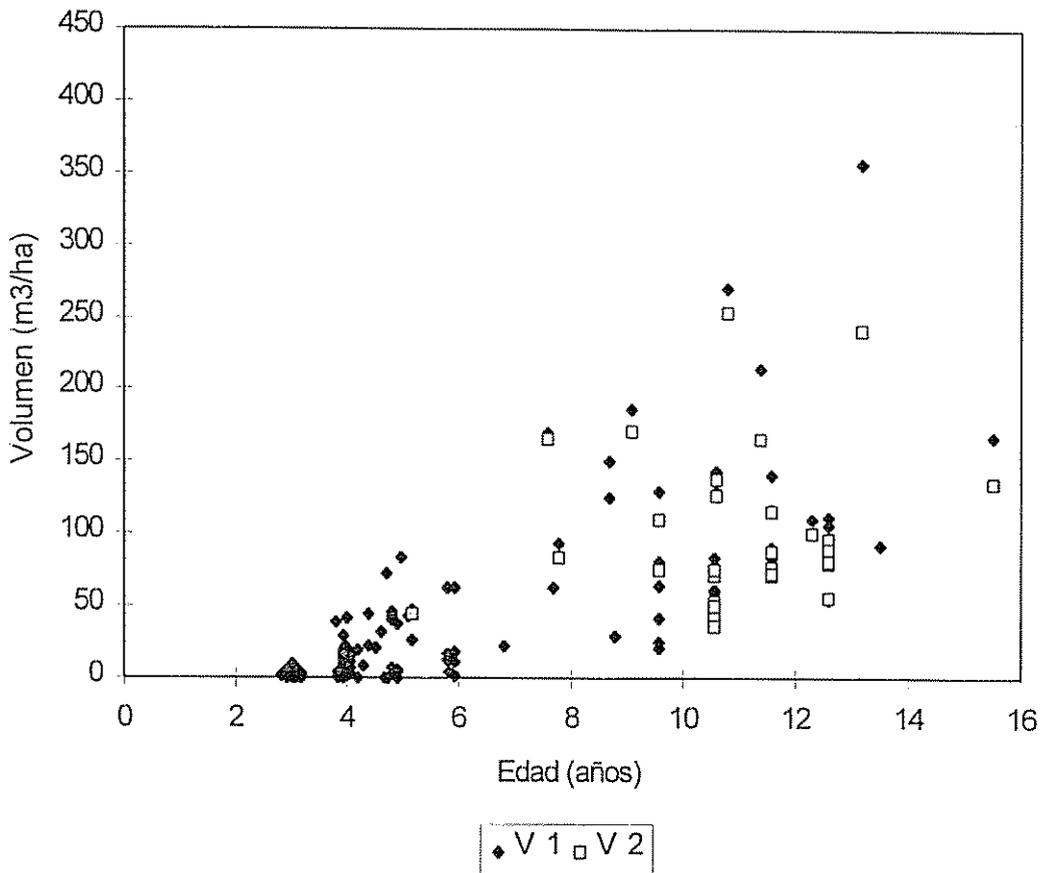


Figura 9: Volumen total (V1) y comercial (V2) de la totalidad de parcelas de *B. quinatum*.

Una situación diferente a la descrita para *T. grandis* y para *B. quinatum*, es la presentada en *G. arborea* (Figura 10), donde la mayoría de los sitios presentaron volumen comercial, señalando que las dimensiones eran prácticamente coincidentes con el rango de construcción de su respectiva función de volumen comercial.

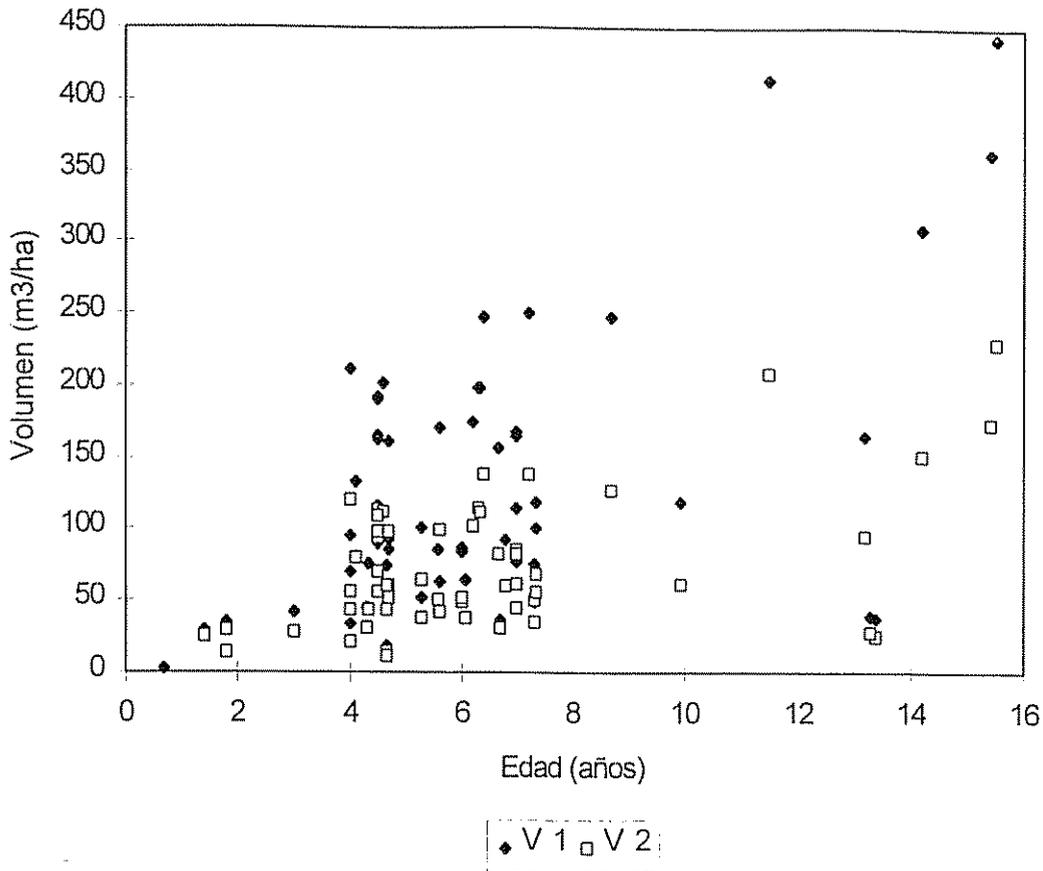


Figura 10: Volumen total (V1) y comercial (V2) de la totalidad de parcelas de *G. arborea*

De acuerdo a lo señalado en la metodología, se determinó la productividad para cada especie en estudio y ésta fue clasificada en base al IMA-G y en forma simultánea se caracterizó el crecimiento y productividad de los sitios, en términos del IMA en Dap, IMA en altura, e IMA en volúmenes (Cuadro 19). De este modo se podrían comparar sitios y especies a diferentes edades.

Cabe señalar que la utilidad de esta clasificación, está limitada al rango de variación que presentan las variables empleadas, sirviendo para los primeros años de vida, ya que en la mayoría de los sitios analizadas, los rodales eran jóvenes con una edad promedio de aproximadamente 6 años (Cuadro 18).

Cuadro 19: Clasificación en cinco clases de crecimiento y productividad, de las especies analizadas, según variable

<i>T. grandis</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.97	1.98 - 2.50	2.51 - 3.01	3.02 - 3.59	≥ 3.60
IMA-H	(m/año)	≤ 1.70	1.71 - 2.35	2.36 - 3.13	3.14 - 3.99	≥ 4.00
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 1.14	1.15 - 2.06	2.07 - 2.76	2.77 - 3.57	≥ 3.58
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 4.13	4.14 - 11.95	11.96 - 17.80	17.81 - 25.50	≥ 25.51
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 9.86	9.87 - 14.14	14.15 - 18.27	18.28 - 24.92	≥ 24.93

<i>B. quinatum</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.16	1.17 - 1.69	1.70 - 2.17	2.18 - 3.05	≥ 3.06
IMA-H	(m/año)	≤ 0.71	0.72 - 1.01	1.02 - 1.25	1.26 - 1.60	≥ 1.61
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 0.16	0.17 - 0.49	0.50 - 1.20	1.21 - 2.21	≥ 2.22
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 0.19	0.20 - 0.96	0.97 - 3.75	3.76 - 9.72	≥ 9.73
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 4.97	4.98 - 6.83	6.84 - 8.75	8.76 - 15.52	≥ 15.53

<i>G. arborea</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.95	1.96 - 2.90	2.91 - 3.60	3.61 - 4.41	≥ 4.42
IMA-H	(m/año)	≤ 1.40	1.41 - 2.34	2.35 - 3.20	3.21 - 3.70	≥ 3.71
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 1.65	1.66 - 2.21	2.22 - 3.33	3.34 - 4.53	≥ 4.54
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 8.52	8.53 - 15.73	15.74 - 24.45	24.46 - 37.15	≥ 37.16
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 6.25	6.26 - 9.09	9.10 - 12.84	12.85 - 20.53	≥ 20.54

Al analizar el Cuadro 18 y Cuadro 19, podemos señalar que *B. quinatum*, presenta los menores incrementos en relación a las otras dos especies, y por consiguiente las menores clases de productividad, lo cual concuerda con lo descrito por Vásquez y Ugalde (1994).

B. quinatum, exhibe la menor densidad inicial promedio de plantación (Cuadro 18), por lo tanto se esperaría un mayor desarrollo, ya que cada árbol en promedio dispone de un "mayor espacio para crecer"; sin embargo, también presenta la menor sobrevivencia, por lo tanto podemos suponer que la falta de manejo adecuado, favorece la competencia interespecífica y origina su menor productividad en términos promedios.

También un espaciamiento excesivo, en algunos lugares de 5 por 5 metros, con un manejo deficiente, origina una menor calidad de la madera, al presentarse ramas con diámetros mayores y la proliferación de brotes epicórmicos. Si el manejo de estas plantaciones fuera intensivo, se lograría un buen desarrollo de la plantación.

T. grandis, presenta su rango de valores para IMA-Dap, IMA-G e IMA-V1 inferiores a los de *G. arborea*, lo cual permite aseverar que *G. arborea*, especie de más rápido crecimiento, presenta una mayor productividad que *T. grandis* en el área donde se desarrolló este estudio.

Se caracterizó tanto el crecimiento como la productividad para las tres especies, de forma análoga a lo realizado en índice de sitio (el resumen se presenta en el Cuadro 20, en tanto en el Cuadro 2a del anexo, se presenta de manera detallada). El objetivo fue identificar los cantones y sitios (al relacionarlo con los resultados del Cuadro 9) que presentaron los menores (Marginal) y mayores (Excelente) crecimientos y productividad

Para las tres especies (Cuadro 2a del anexo), al igual que lo señalado para el índice de sitio, los cantones que presentan el mayor número de lotes clasificados como Excelentes, muestran en la mayoría de los casos igual comportamiento de lotes clasificados como Altos. Esto es un claro indicio del potencial productivo de esos cantones.

Cuadro 20: Resumen de la distribución en clases de crecimiento o productividad (Excelente y Marginal) según especie, variable, cantón y sitio.

Especie	Variable	Clase	Media	Cantón	Lotes en los sitios
<i>T. grandis</i>	IMA - Dap (cm/año)	Excelente	4.11	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
		Marginal	1.53	Bagaces Hojancha	Bagaces y Pelon de la Bajura Pilangosta, Puerto Carrillo y Santa Marta
			1.66	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
	IMA- H (m/año)	Excelente	4.49	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
		Marginal	1.33	Bagaces Hojancha	Bagaces y Pelon de la Bajura Pilangosta, Puerto Carrillo y Santa Marta
			1.48	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
	IMA - G (m ² /ha/año)	Excelente	4.07	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
		Marginal	0.68	Bagaces Nandayure	Bagaces y Pelon de la Bajura Moravia y Punta Coyote
			0.64	Nicoya	Garza
	IMA - V 1 (m ³ /ha/año)	Excelente	28.69	Nandayure	Acoyada, Moravia y Punta Coyote
		Marginal	1.51	Bagaces Nandayure	Bagaces Moravia y Punta Coyote
			1.59	Nicoya	Garza
	IMA - V 2 (m ³ /ha/año)	Excelente	27.32	Nandayure	Moravia y Punta Coyote
		Marginal	7.92	Hojancha	Cuesta Blanca, Guapinol, La Arena, Matambú, Pilangosta, Puerto Carrillo y Santa Marta
	<i>B. quinatum</i>	IMA - Dap (cm/año)	Excelente	3.57	Nicoya
Marginal			0.93	Nicoya Santa Cruz	Garza Río Tabaco
			0.70	Nicoya	Garza y Zapote
IMA- H (m/año)		Excelente	1.82	Nicoya	Garza
		Marginal	0.59	Nicoya Santa Cruz	Garza Río Tabaco
			0.46	Nicoya	Buenavista, Copal, Garza, Matambú, Quirimán y Zapote
IMA - G (m ² /ha/año)		Excelente	3.38	Santa Cruz	Cuanijiquil, Río Tabaco y Santa Rosa
		Marginal	2.69	Nicoya	Garza
			0.10	Santa Cruz	Río Tabaco
IMA - V 1 (m ³ /ha/año)		Excelente	14.29	Hojancha	Estrada Rávago y Puerto Carrillo
		Marginal	14.74	Nicoya Santa Cruz	Copal, Varillal y Matambu Cuanijiquil, Río Tabaco
			12.91	Nicoya	Garza
			0.10	Santa Cruz	Río Tabaco
			0.09	Santa Cruz	Río Tabaco

Continuación

Cuadro 20: Resumen de la distribución en clases de crecimiento o productividad (Excelente y Marginal) según especie, variable, cantón y sitio.

Especie	Variable	Clase	Media	Cantón	Lotes en los sitios
<i>B. quinaltum</i>	IMA - V 2 (m ³ /ha/año)	Excelente	21.17	Upala	El Carmen y Municipalidad
		Marginal	3.93	Hojancha	Puerto Carillo
<i>G. arborea</i>	IMA - Dap (cm/año)	Excelente	4.84	Hojancha	Pilangosta y Pita Rayada
			5.10	Upala	Dos Ríos
		Marginal	0.95	Bagaces	La Virgen
			1.87	Cañas	Ganadería Montezuma y La Roca
			1.65	Hojancha	Pilangosta y San Rafael
	IMA- H (m/año)	Excelente	4.22	Hojancha	Betania y Lajas
			4.20	La Cruz	El Gallo
		Marginal	0.65	Bagaces	La Virgen
			1.10	Cañas	Ganadería Montezuma y La Roca
IMA - G (m ² /ha/año)	Excelente	8.06	Abangares	Colorado	
		5.50	Cañas	Tiquirusa	
		4.66	Hojancha	Betania	
		6.41	Liberia	El Gallo	
		4.84	Nicoya	Guastomal	
		7.89	Upala	Dos Ríos	
		0.66	Bagaces	La Virgen	
		1.30	Hojancha	Lajas y Pilangosta	
		1.14	Santa Cruz	Río Tabaco	
IMA - V 1 (m ³ /ha/año)	Excelente	41.94	Hojancha	Betania y La Arena	
	Marginal	2.97	Bagaces	La Virgen	
	3.55	Santa Cruz	Río Tabaco		
IMA - V 2 (m ³ /ha/año)	Excelente		Cañas	Tiquirusa	
			Hojancha	Betania	
			La Cruz	El Gallo	
			Nandayure	Carmona	
			Nicoya	Guastomal	
			Santa Cruz	San Juan	
		Marginal		Bagaces	La Virgen
			Santa Cruz	Río Tabaco	

Como era de esperar, se presentan diversos resultados dependiendo de la variable utilizada para realizar la clasificación de los sitios. De todos modos se presenta menor variación en la clasificación de sitios Marginales y Excelentes que los clasificados como Bajos, Medios y Altos.

En *T. grandis*, a pesar de los resultados variables se pudo establecer que en el cantón de Nandayure, los sitios Moravia y Punta Coyote, siempre presentaron parcelas catalogadas como Excelentes. Por su parte, el sitio Bagaces, ubicado en el cantón del mismo nombre, siempre fue clasificado como Marginal.

En *B. quinatum*, se determinó que los sitios Garza y Zapote pertenecientes al cantón de Nicoya, en la mayoría de las clasificaciones, siempre presentaron el mayor número de parcelas clasificadas como Excelentes. A su vez, parcelas del sitio Río Tabaco, en la mayoría de los casos fueron clasificadas como Marginales.

En *G. arborea*, el sitio Betania ubicado en el cantón de Hojancha, en la mayoría de los casos, presentaron el mayor número de parcelas clasificadas como Excelentes. En tanto, el sitio La Virgen del cantón Bagaces fue clasificado como Marginal en todos los casos.

Este estudio incorporó sitios en el cantón de San Carlos y en la zona sur (Osa y Pérez Zeledón). El sitio de San Carlos tuvo variación en su clasificación desde Bajo a Excelente, según la variable clasificatoria. En tanto los ubicados en la zona sur variaron desde Marginal a Alto.

En un mismo sitio, se presentan parcelas catalogadas de manera radicalmente opuesta (Marginales y Excelentes), eso señala que los diferentes lotes existentes deberán ser manejados en forma variable, según su condición limitante primordial, para asegurar un rendimiento promedio determinado. Al presentarse áreas dentro de los lotes, con severas limitaciones al desarrollo de las plantaciones, lo más recomendable sería no reforestar y dedicar esas áreas a otro tipo de uso.

Como puede apreciarse, la clasificación por crecimiento y productividad presenta múltiples resultados y en cada caso el investigador o extensionista deberá determinar que tipo de clasificación es la más adecuada a cada situación en particular. Debe recordarse, que todas estas variables están influidas por el manejo a que son sometidos los sitios, por lo tanto, la aplicación de esta clasificación debe hacerse juiciosamente.

6.3. Relación del índice de sitio con variables fisiográficas, climáticas y edáficas

Antes de analizar la relación entre el índice de sitio y las variables fisiográficas, climáticas y edáficas, se procederá a describir por calidad de sitio las variables antes mencionadas, contenidas desde el Cuadro 10 al Cuadro 11 y explicar su correlación con la variación del índice de sitio (Cuadro 3a al 5a del anexo). El objetivo de esta descripción es vislumbrar someramente, el comportamiento de las variables en relación al normal desarrollo de las especies en estudio, tomado como base principal, lo reportado por Chaves y Fonseca (1991), CATIE (1991) y Murillo y Valerio (1991), ver acápite 4.1

6.3.1. Variables fisiográficas y climáticas

El resumen de las variables fisiográficas y climáticas continuas y discretas, se presenta en el Cuadro 21 y Cuadro 22, respectivamente. En base a la información proporcionada en dichos Cuadros, se ilustró la relación entre las variables fisiográficas y climáticas y la variación del índice de sitio.

La elevación de las parcelas analizadas, tanto en *T. grandis* como en *B. quinatum*, está dentro del rango de variación reportada para la especie y su relación con el índice de sitio no es significativa (Cuadro 3a y 4a del anexo).

En cambio, algunas parcelas de *G. arborea* (Figura 11), están muy próximas a su límite altitudinal máximo. Debido a esto, es posible que dichas parcelas hayan sido catalogadas en una clase de sitio marginal y bajo. Una relación inversamente

proporcional ($r = -0.39$) estadísticamente significativa ($P < 0.05$) se determinó entre elevación e índice de sitio (Cuadro 5a del anexo). En Estados Unidos se han obtenido resultados similares al relacionar el índice de sitio de *Abies amabilis* (Dougl.) Forbes y *P. menziesii*. var glauca (Beissn.) Franco con la elevación (Radwan, Murray y Kraft, 1989; Monserud, Moody y Breuer, 1990).

Cuadro 21: Resumen de las variables cuantitativas fisiográficas y climáticas promedios, según especie y clase de índice de sitio.

Especie	Clase de sitio	IS (m)	ELEV (m)	PMA (mm)	TMA (°C)	DEFHID (Meses)	PEND (%)
<i>T. grandis</i>	Marginal	9.45	88.1	1826.5	27.2	6.3	7.6
	Bajo	15.21	170.0	2018.2	26.5	5.2	30.7
	Medio	18.76	165.0	2062.8	26.5	4.9	18.4
	Alto	21.27	137.9	2102.6	26.7	5.0	15.8
	Excelente	26.60	120.0	1678.0	26.4	5.8	15.6
<i>B. quinatum</i>	Marginal	6.22	132.5	2445.6	26.8	4.9	21.0
	Bajo	9.25	170.6	1940.6	25.8	5.2	12.8
	Medio	11.65	153.7	2108.7	26.1	4.8	26.2
	Alto	14.78	118.5	2177.9	26.6	4.8	11.3
	Excelente	18.24	111.1	2468.7	26.1	4.9	6.2
<i>G. arborea</i>	Marginal	10.52	439.3	2047.0	27.3	4.5	7.5
	Bajo	18.11	308.1	2024.3	26.7	5.4	16.4
	Medio	21.30	297.7	2125.3	26.5	5.0	16.0
	Alto	23.12	140.5	2004.7	26.0	5.1	11.9
	Excelente	27.92	158.0	1770.0	26.8	5.0	17.2

Donde:

IS	=	Índice de sitio, a los 10 años en metros
ELEV	=	Elevación, en msnm
PMA	=	Precipitación media anual, en mm
TMA	=	Temperatura media anual, en °C
DEFHID	=	Déficit hídrico, en número de meses con precipitación menor a 100 mm
PEND	=	Pendiente promedio del terreno, en porcentaje

Cuadro 22: Resumen porcentual de las variables discretas fisiográficas y climáticas para diferentes códigos de cada variable, según especie y clase de sitio

Clase de sitio	Código	T. grandis					B. quinatum					G. arborea							
		PTOP	DREN	PEDRE	ERO	ASPE	VIENTO	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	ASPE	VIENTO	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	ASPE	VIENTO
Marginal	1.0	25.0	87.5	56.3	81.3	12.5	18.8	12.5	87.5	62.5	62.5	62.5	50.0	100.0	100.0	75.0			
	2.0	37.5	12.5	43.8	12.5	18.8	81.3	50.0	12.5	37.5	37.5	12.5	50.0			25.0	25.0		
	3.0	18.8			6.3	12.5		12.5			25.0						50.0	100.0	
	4.0	18.8			6.3			25.0											
	5.0				50.0						37.5								
Bajo	1.0	22.7	72.7	90.9	22.7	4.5	68.2	30.0	80.0	90.0	50.0	40.0	18.2	100.0	90.9	27.3	9.1	45.5	
	2.0	36.4	27.3	9.1	59.1	45.5	27.3	30.0	20.0	10.0	50.0	30.0	36.4		9.1	63.6	18.2	36.4	
	3.0	27.3			18.2	18.2	4.5	20.0			20.0	20.0	18.2			9.1	27.3	18.2	
	4.0	13.6			4.5			20.0			30.0	30.0	27.3			27.3		27.3	
	5.0				27.3						20.0							18.2	
Medio	1.0	33.3	75.0	91.7	8.3	8.3	66.7	25.0	87.5	100.0	62.5	62.5	25.0	100.0	87.5	37.5	37.5		37.5
	2.0	25.0	25.0	8.3	58.3	16.7	33.3		12.5		37.5	25.0	25.0		12.5	62.5	12.5	62.5	
	3.0	16.7			33.3	66.7		12.5			25.0	25.0	62.5			12.5		12.5	
	4.0	25.0			8.3			62.5			25.0	25.0	12.5			62.5		62.5	
	5.0										25.0							12.5	
Alto	1.0	4.0	84.0	100.0	28.0	16.0	68.0	5.9	94.1	100.0	52.9	94.1	7.7	100.0	100.0	53.8	7.7	61.5	
	2.0	32.0	16.0		44.0	16.0	32.0	23.5	5.9		47.1	17.6	15.4			46.2	38.5	30.8	
	3.0	24.0			28.0	24.0		35.3				17.6	46.2				7.7	7.7	
	4.0	40.0			32.0			35.3				35.3	30.8				23.1		
	5.0				12.0						23.5						23.1		
Excelente	1.0	20.0	100.0	100.0	60.0	20.0	80.0	22.2	100.0	88.9	66.7	77.8		100.0	80.0	60.0		60.0	
	2.0	60.0			40.0	20.0	20.0	22.2		11.1	33.3	22.2			20.0	20.0		40.0	
	3.0	20.0				20.0						22.2	40.0		20.0	20.0		20.0	
	4.0				20.0			55.6			44.4		60.0					60.0	
	5.0				20.0						33.3							20.0	

PTOP = Posición topográfica, DREN = Drenaje, PEDRE = Pedregocidad, ERO = Erosión, ASPE = Aspecto y VIENTO = Viento

Las celdas en blanco señalan que esas clases no fueron representadas en el muestreo realizado

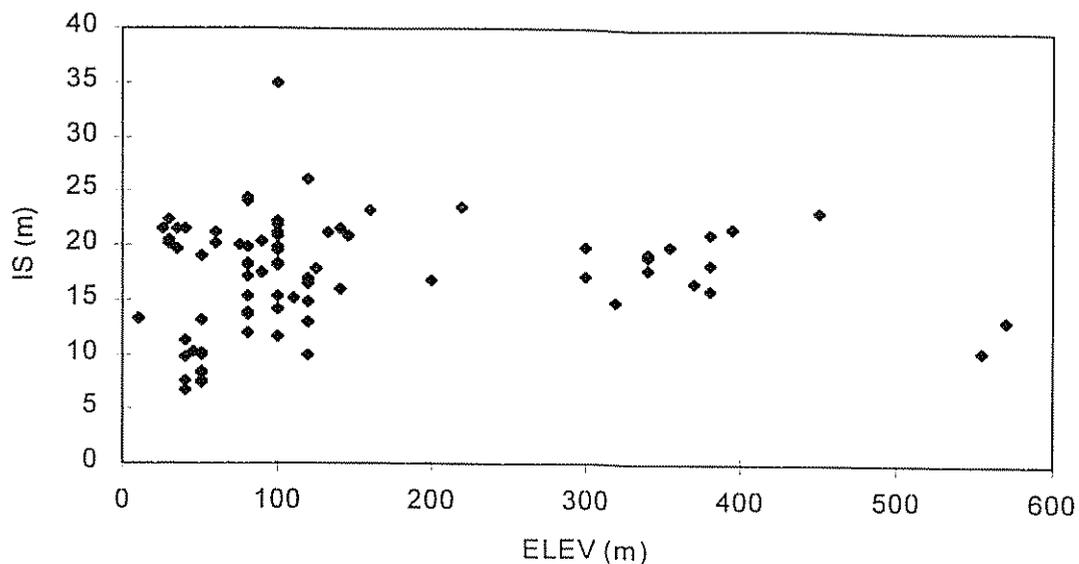


Figura 11: Relación entre la elevación del terreno y el índice de sitio, para *G. arborea*

El rango promedio de variación de precipitación media anual, fluctúa dentro de los límites señalados en la literatura y no se aprecia una tendencia clara entre dicha variable y el índice de sitio, por lo tanto es plausible suponer que no habrá una relación significativa entre estas variables. Esto se verificó al observar los Cuadros 3a al 5a del anexo, donde no hubo una relación estadísticamente significativa entre las variables., difiriendo de lo encontrado para *B. quinatum* por Navarro (1987) y para *T. grandis* por Vásquez y Ugalde (1994), donde se presentó una relación lineal estadísticamente significativa entre el índice de sitio y la precipitación media anual y en ambos casos, la variable fue incluida en el modelo de predicción del índice de sitio.

La temperatura media anual se encuentra entre los rangos de variación citados en la literatura para las tres especies y solo *T. grandis* (Figura 12), presentó una relación inversamente proporcional con el índice de sitio (Cuadro 3a del anexo), donde esta variable posee un coeficiente de correlación de -0.47, el cual es altamente significativo ($P < 0.01$).

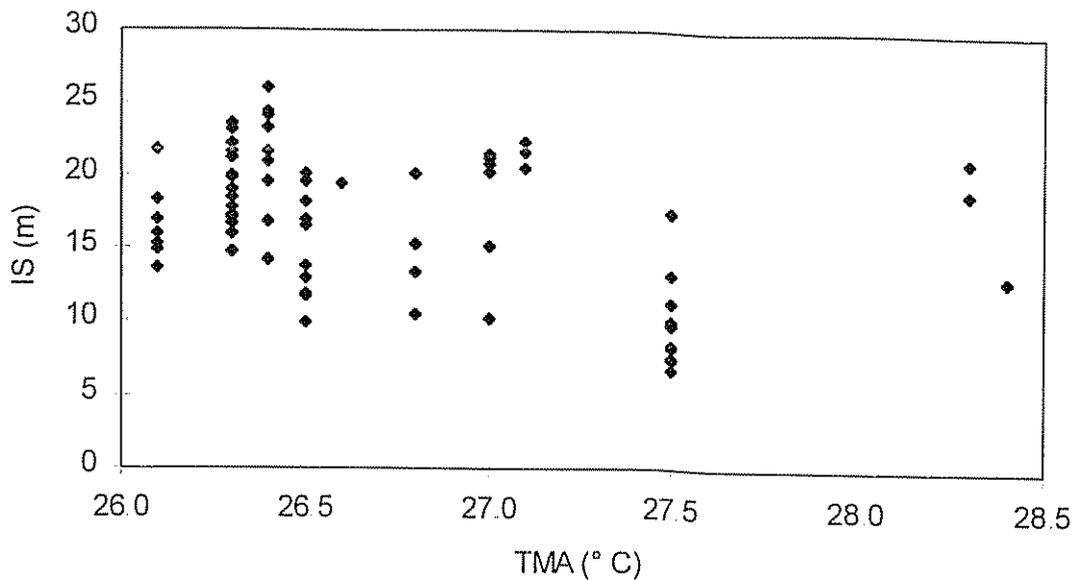


Figura 12: Relación de la temperatura media anual con el índice de sitio, para *T. grandis*

El déficit hídrico, expresado como el número de meses con una precipitación inferior a 100 mm, permanece en promedio casi constante, por lo tanto se presupone que esta variable no explicará la variación del índice de sitio de manera satisfactoria. Pese a esto, el análisis de correlación muestra un relación ($r = -0.47$) altamente significativa ($P < 0.01$) (Cuadro 3a del anexo), entre el déficit y el índice de sitio de *T. grandis* (Figura 13), lo cual concuerda con el estudio llevado a cabo por Navarro (1987), donde el déficit hídrico fue incorporado como variable explicativa de la variación del índice de sitio de *B. quinatum*.

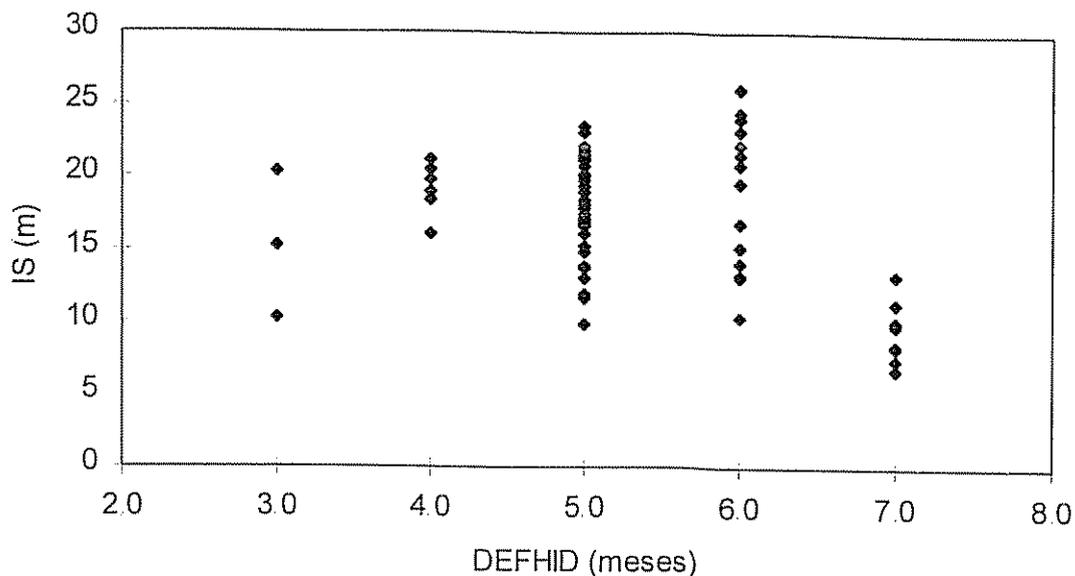


Figura 13: Relación entre déficit hídrico y el índice de sitio, para *T. grandis*

La literatura indica que a mayores pendientes, el desarrollo de las tres especies se ve influenciado negativamente, esto se apreció más claramente en *B. quinatum* (Figura 14), donde al disminuir en promedio la pendiente, el índice de sitio aumenta. Por lo tanto la relación es inversamente proporcional (Cuadro 4a del anexo), con un coeficiente de correlación de -0.36 el cual es estadísticamente significativo ($P < 0.05$). Esto confirmaría lo reportado por Navarro (1987), quien describió una relación similar para esta misma especie. En las restantes especies, el comportamiento de la pendiente es más bien errático, por lo que no presentan un relación lineal con el índice de sitio (Cuadro 3a y 5a del anexo)

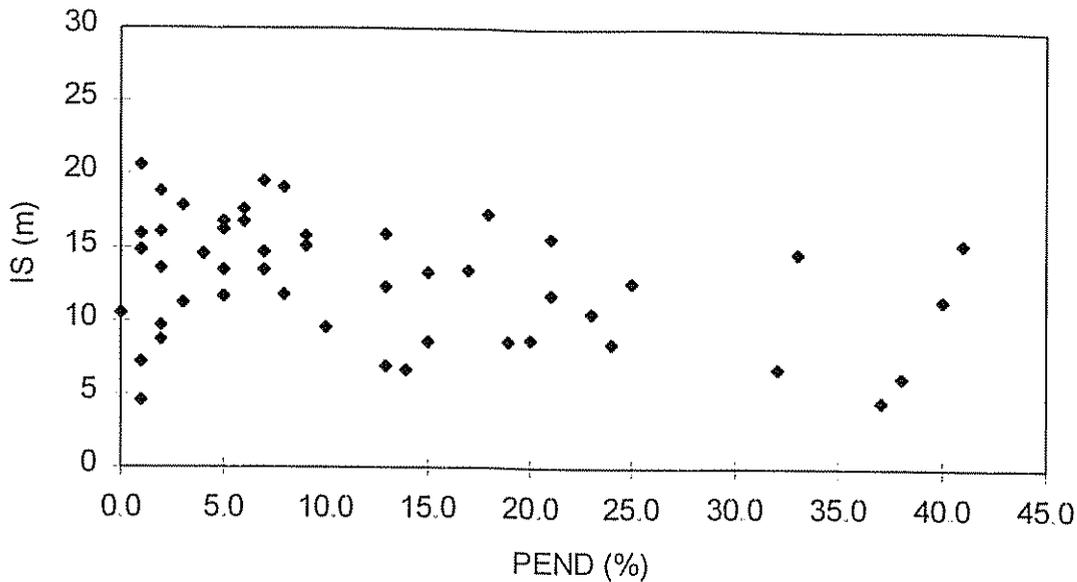


Figura 14: Relación entre la pendiente y el índice de sitio, para *B. quinatum*

Vásquez y Ugalde (1994), determinaron para *G. arborea*, que la posición topográfica afecta de manera positiva el índice de sitio, es decir los sitios con un código 3 y 4 (Pendiente inferior y fondo plano respectivamente), serán preferibles a las cimas o pendientes medias (código 1 y 2). Esto concuerda con lo encontrado en el presente estudio (Figura 15), donde la clase marginal está representada por sitios ubicados en su totalidad en cimas o pendientes medias, las clases de sitios superiores muestran una tendencia a aumentar el porcentaje de sitios en código 3 y 4, cuya expresión máxima se alcanza en la clase excelente donde solo hay sitios en pendiente inferior y fondo plano. Esta variable presenta el mayor coeficiente de correlación ($r = 0.60$), el cual fue altamente significativo ($P < 0.01$) (Cuadro 5a del anexo). En *T. grandis* y *B. quinatum*, la relación no es clara ya que los porcentajes por código tienen gran variabilidad, lo que manifiesta una relación no significativa con el índice de sitio (Cuadro 3a y 4a del anexo).

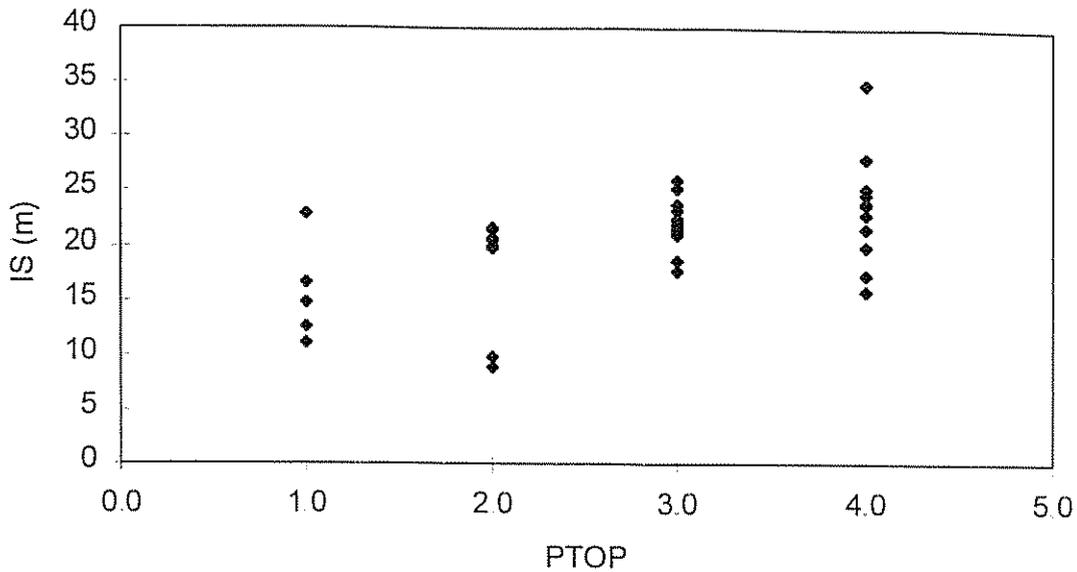


Figura 15: Relación entre la posición topográfica y el índice de sitio, para *G. arborea*

Para las tres especies, la literatura señala que los sitios deben tener un buen drenaje para que no se presenten condiciones anaeróbicas en el suelo, por lo tanto se esperaría que en la medida que la clase de sitio mejore, el porcentaje de sitios en código 1 (drenaje libre) aumente; sin embargo, los resultados mostraron un patrón similar entre las clases de sitio para *T. grandis* y *B. quinatum*, lo cual imposibilitó la visualización de una relación entre esta variable y el índice de sitio. *G. arborea* presenta el caso extremo, donde todas las clases de sitio poseen drenaje libre. Las tres especies, no presentan una relación lineal significativa con el índice de sitio (Cuadros 3a al 5a del anexo).

El aumento de pedregosidad, afecta de manera negativa al índice de sitio y en casos extremos se podría presentar un mayor escurrimiento superficial y una menor penetración de raíces. Por lo tanto, debería aumentar el porcentaje de sitios con menor pedregosidad al mejorar la calidad de sitio. Esta relación se manifestó en *T. grandis* (Figura 16) con un coeficiente de correlación de -0.41 (Cuadro 3a de anexo) altamente significativo ($P < 0.01$), mientras que en *B. quinatum* y *G. arborea*, no se presentó una relación significativa.

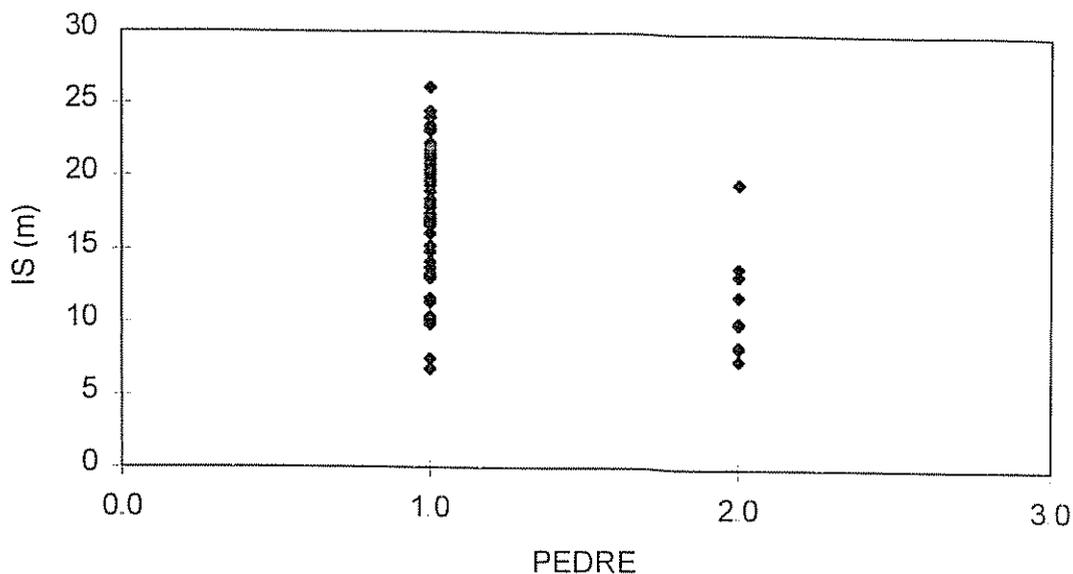


Figura 16: Relación entre pedregosidad y el índice de sitio, para *T. grandis*

La variable pedregosidad, posee solo dos códigos, lo cual dificulta la posibilidad de correlacionarla con el índice de sitio, ya que no hay suficiente rango de variación (en *G. arborea*, no se pudo establecer correlaciones con las variables, ya que el valor de esta variable fue constante) por lo tanto sería aconsejable, en futuras investigaciones, segregar en un mayor número de códigos (no más de 4) esta variable.

La variable erosión, no presentó una relación con el índice de sitio, para los datos obtenidos, ya que al mejorar la calidad de sitio, se esperaba un aumento de sitios con menor erosión; sin embargo, las clases de sitio presentan porcentajes variables de erosión (Cuadro 22) y no es posible observar una tendencia al respecto, lo indicó una falta de relación entre esta variable y el índice de sitio (Cuadro 3a al 5a del anexo).

La literatura no indica de un aspecto o exposición, en particular para el mejor desarrollo de las especies en estudio, probablemente ya que esta variable afecta particularmente en zonas de latitudes extremas o en aquellas de nubosidad determinada. Esto se ve corroborado con los datos obtenidos, donde se presentó una variación de esta variable que no tuvo directa relación con la variación en el índice de sitio (Cuadros 3a al 5a del anexo).

Normalmente la calidad de un sitio, será superior en la medida que haya una menor influencia del viento sobre las especies, ya que se podrían producir severos daños mecánicos (Lamprecht, 1990). En nuestro caso, al mejorar la calidad de sitio, debería aumentar el porcentaje de sitios con una baja influencia del viento sobre el crecimiento de los árboles (código 1). Para las tres especies (Figura 17 a la Figura 19), se presentó claramente esta relación (Cuadros 3a al 5a del anexo), en *T. grandis* ($r = -0.32$) y en *G. arborea* ($r = -0.54$), los coeficientes de correlación fueron altamente significativos ($P < 0.01$), por su parte el coeficiente de correlación de *B. quinatum* ($r = -0.31$) solo fue estadísticamente significativo ($P < 0.05$). Esto confirmaría lo encontrado por Vásquez y Ugalde (1994), quienes, utilizaron esta variable en dos de sus tres modelos, como explicativa de la variación en índice de sitio.

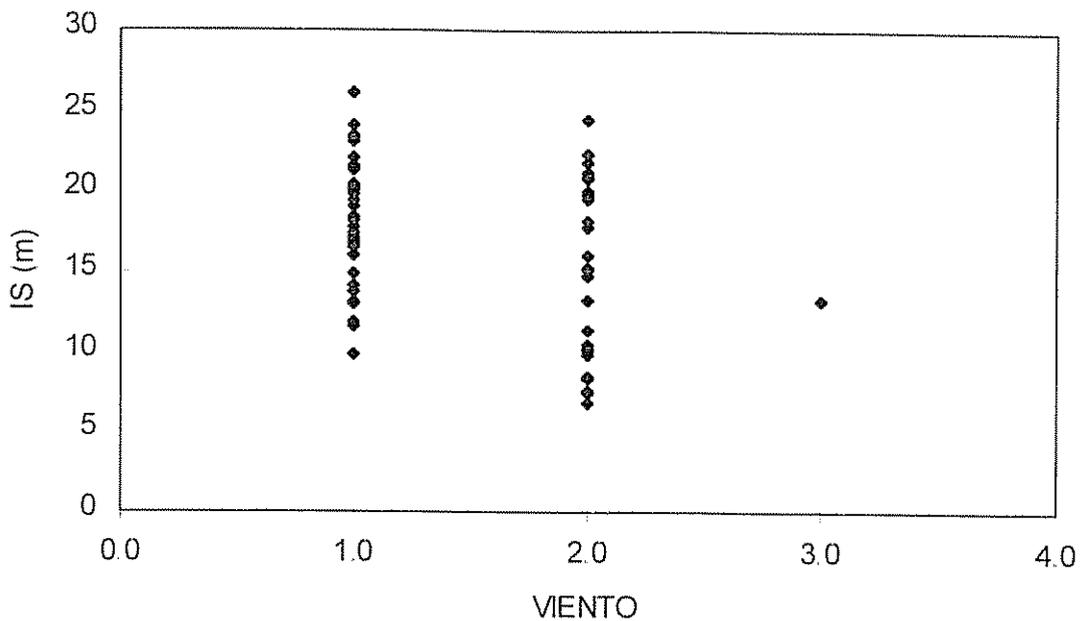


Figura 17: Relación entre el viento y el índice de sitio, para *T. grandis*

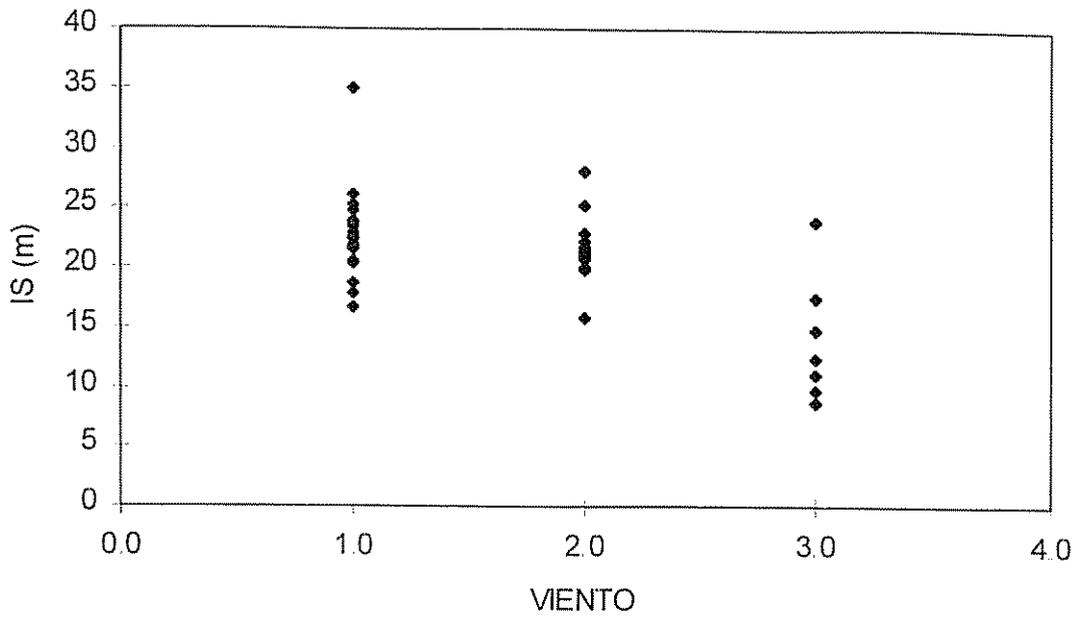


Figura 18: Relación entre el viento y el índice de sitio, para *G. arborea*

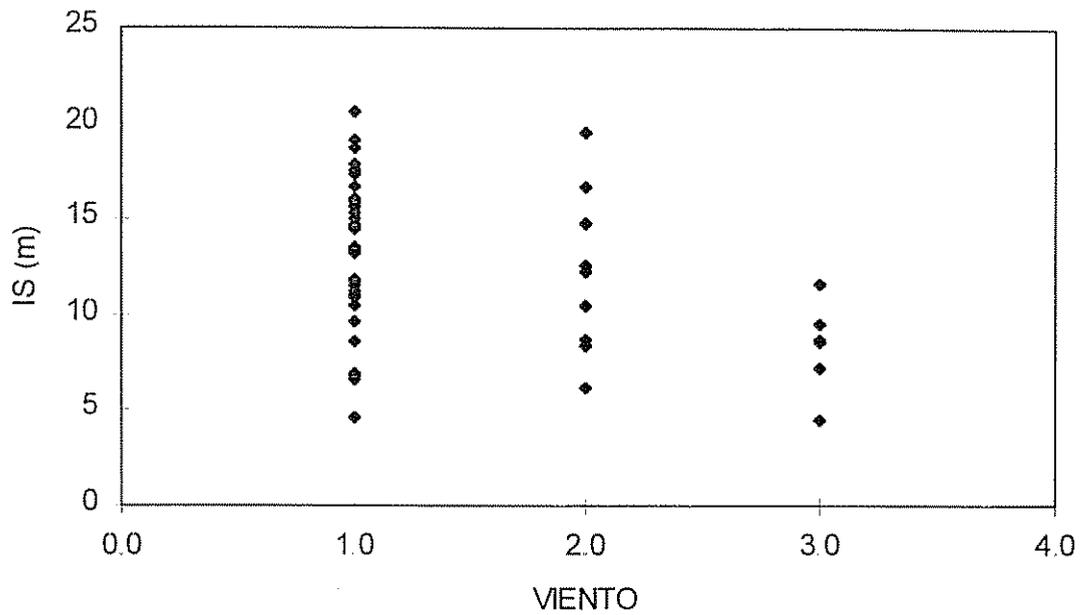


Figura 19: Relación entre el viento y el índice de sitio, para *B. quinatum*

6.3.2. Variables edáficas

Los análisis químicos efectuados a las muestras de suelo, tienen como base de comparación, valores generados en base requerimientos de cultivos agrícolas (Cuadro 23), los cuales no necesariamente podrían corresponder a los requerimientos de las especies arbóreas consideradas en este trabajo.

Cuadro 23: Niveles críticos de elementos para la interpretación de suelos

Variable	Categorías		
	Baja	Media	Alta
pH agua 1:2.5	< 5.5	5.5 - 6.5	> 6.5
Acidez cmol(+)/L	< 0.5	0.5 - 1.5	> 1.5
MO (%)	< 2.0	2.0 - 4.0	4.1 - 10
Ca cmol(+)/L	< 4.0	4.0 - 20.0	> 20
Mg cmol(+)/L	< 1.0	1.0 - 5.0	> 5
K cmol(+)/L	< 0.2	0.2 - 0.6	> 0.6
P mg/L	< 10	10 - 20	> 20

Fuente: Adaptación de Bertsch (1987)

No obstante, estos niveles críticos fueron utilizados para comparar y clasificar la fertilidad de los suelos muestreados en este estudio. En el Cuadro 24, se aprecia por especie el porcentaje de sitios en cada categoría señalada por Bertsch (1987).

Cuadro 24: Distribución porcentual por especie, de los sitios contemplados en este estudio, utilizando la clasificación de Bertsch (1987)

Especie	Categoría	Variable						
		pH	Acidez	MO	Ca	Mg	K	P
<i>T. grandis</i>	bajo	5.8	95.8	29.5	2.2	0.0	52.5	94.1
	medio	54.7	1.7	39.6	56.1	40.3	37.4	4.2
	alto	39.6	2.5	30.9	41.7	59.7	10.1	1.7
<i>B. quinatum</i>	bajo	4.1	100	21.6	1.4	1.4	45.9	88.6
	medio	71.6	0.0	28.4	35.1	37.8	33.8	6.8
	alto	24.3	0.0	50.0	63.5	60.8	20.3	4.5
<i>G. arborea</i>	bajo	1.9	100	13.0	1.9	0.0	57.4	100
	medio	72.2	0.0	24.1	42.6	27.8	33.3	0.0
	alto	25.9	0.0	63.0	55.6	72.2	9.3	0.0

Al analizar el cuadro referido, se aprecia que sobre el 94% de los sitios presentan un pH medio a alto, lo cual se ve reflejado en un comportamiento similar de calcio y magnesio, como era de esperarse, ya que al presentarse un pH superior a 5.5, la disponibilidad de la mayoría de los elementos esenciales es adecuada (Bertsch, 1995) y para la provincia de Guanacaste y Puntarenas no hay problemas con estos elementos (Bertsch, 1987).

Llama la atención que aproximadamente un 50% de los sitios están catalogados como bajos en relación al nivel de potasio, para las tres especies, ya que este elemento se debería comportar de manera semejante al calcio y magnesio. La posible explicación la presenta Bertsch (1987), quien señala que existe una fracción de potasio fijado entre las capas de arcillas y que el método de análisis de laboratorio no lo detecta. También este autor indica que las deficiencias en potasio se deben a tres causas: suelos viejos, suelos pobres en arcillas 2:1 y suelos con material parental pobre en potasio. Bajo las condiciones de precipitación de los sitios bajo estudio, posiblemente se presenta un lavado preferencial de cationes monovalentes (potasio), con una acumulación relativa de cationes divalentes (calcio y magnesio)

La acidez tiene relación inversamente proporcional con el pH, ya que al disminuir el pH, la acidez extractable tenderá a aumentar. En este caso, para las tres especies sobre el 95% de los sitios fueron catalogados como bajos en acidez, teniendo relación con el porcentaje de sitios catalogados como bajos en pH, alrededor de un 5%. Esta situación ocurre en áreas trópicas con períodos secos relativamente largos (3-6 meses), contrastando con lo que ocurre en áreas tropicales húmedas.

La distribución porcentual de fósforo, confirma lo indicado por Bertsch (1987), en relación a que este elemento, se encuentra deficitario en la gran mayoría del territorio nacional, sobre todo en las provincias de Guanacaste y Puntarenas. En este caso sobre el 89%, de los sitios presentan una condición considerada bajo.

En relación al contenido de materia orgánica, se indica que es deseable un alto contenido en los suelos, para lograr un adecuado desarrollo de las especies vegetales, ya que mejora la estructura del suelo y aumenta la retención tanto de cationes como aniones (Bertsch, 1987), además es una importante fuente de nitrógeno. En estos casos

se puede señalar que sobre el 70% de los sitios fueron catalogados como medios a altos.

En resumen, se puede concluir que en términos generales los suelos muestreados, presentan una fertilidad natural media a alta.

Con el fin de vislumbrar posibles relaciones entre los elementos descritos y el índice de sitio, se confeccionó el Cuadro 25, donde se resumen las características químicas y físicas de los suelos muestreados que serán contrastadas con los Cuadros 3a al 5a del anexo.

Cuadro 25: Resumen de las variables edáficas químicas y físicas promedios por profundidad del suelo, clase de sitio y especie.

Especie	Clase de sitio	IS (m)	Primera profundidad del suelo (0 - 20 cm)											
			Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	pH	Acidez	Ca	Mg	K	Ca+Mg+K	P	RES
							cmol(+)/L				mg/L	Kg/cm ²		
<i>T. grandis</i>	Marginal	10.19	31	30	38	3.9	6.6	0.1	16.2	5.0	0.4	21.6	1.5	11.8
	Bajo	16.19	25	31	43	4.7	6.2	0.2	17.2	5.6	0.2	23.0	1.7	7.8
	Medio	19.60	24	35	41	4.0	6.2	0.2	21.8	5.9	0.3	28.0	4.2	7.0
	Alto	22.12	29	33	38	4.3	6.2	0.1	21.1	6.4	0.3	27.8	5.0	6.1
	Excelente	30.50	19	41	40	3.8	6.6	0.1	29.9	8.8	0.1	38.8	8.8	7.0
<i>B. quinatum</i>	Marginal	6.22	32	32	36	4.6	6.7	0.1	17.8	5.2	0.3	23.3	4.8	10.6
	Bajo	9.42	28	35	37	4.7	6.0	0.1	15.1	4.2	0.5	19.8	1.3	11.9
	Medio	12.28	25	33	42	4.9	6.0	0.1	22.0	7.3	0.4	29.7	7.0	8.1
	Alto	15.22	28	39	33	5.5	6.1	0.1	19.4	7.7	0.4	27.5	4.5	9.6
	Excelente	18.24	28	36	36	4.5	6.3	0.1	24.6	5.1	0.6	30.3	7.8	10.7
<i>G. arborea</i>	Marginal	10.52	44	26	30	4.9	5.7	n.d.	6.0	1.6	0.5	8.1	n.d.	n.d.
	Bajo	18.34	30	36	33	6.2	6.2	0.1	16.4	6.2	0.2	22.8	1.5	5.9
	Medio	21.43	31	32	37	5.4	6.4	0.1	19.0	8.6	0.2	27.8	0.4	6.4
	Alto	23.42	31	37	32	5.6	6.1	0.1	18.0	6.2	0.3	24.5	0.6	6.7
	Excelente	28.59	41	31	28	6.6	6.3	n.d.	22.3	6.7	0.7	29.7	n.d.	n.d.

Continuación ...

Cuadro 25: Resumen de las variables edáficas químicas y físicas promedios por profundidad del suelo, clase de sitio y especie.

Especie	Clase de sitio	IS (m)	Segunda profundidad del suelo (20 - 40 cm)										
			Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	pH	Acidez	Ca	Mg	K	Ca+Mg+K	P
									cmol(+)/L			mg/L	
<i>T. grandis</i>	Marginal	10.19	31	28	41	2.0	6.7	0.1	17.0	5.6	0.4	23.0	1.7
	Bajo	16.19	20	27	53	2.1	6.5	0.2	19.3	6.3	0.1	25.7	0.5
	Medio	19.60	18	30	52	1.6	6.4	0.1	22.4	7.4	0.2	30.0	2.5
	Alto	22.12	28	26	46	1.5	6.5	0.1	20.7	7.4	0.2	28.3	3.3
	Excelente	30.50	18	38	44	3.1	6.9	0.1	29.3	8.6	0.1	38.0	8.2
<i>B. quinatum</i>	Marginal	6.22	30	30	40	2.2	6.9	0.1	25.1	6.5	0.1	31.7	2.3
	Bajo	9.42	33	26	42	1.2	6.7	0.1	25.4	3.9	0.2	29.5	1.9
	Medio	12.28	23	28	50	1.6	6.5	0.1	25.3	11.3	0.2	36.8	2.7
	Alto	15.22	23	29	49	2.8	6.5	0.1	18.4	10.5	0.6	29.5	2.1
	Excelente	18.24	28	32	40	2.1	6.9	0.1	33.8	3.0	0.2	37.0	4.6
<i>G. arborea</i>	Marginal	10.52	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Bajo	18.34	22	27	51	2.4	6.7	0.1	24.3	13.3	0.1	37.7	0.5
	Medio	21.43	27	30	43	1.4	6.8	0.1	26.3	12.3	0.0	38.6	0.2
	Alto	23.42	14	29	57	2.2	6.4	0.1	23.9	8.8	0.0	32.7	0.0
	Excelente	28.59	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. = valor no determinado

Para las tres especies, en ambas profundidades, el contenido de arena, limo, arcilla, la materia orgánica, el pH y la acidez extractable no presentaron una relación consistente con el índice de sitio (Cuadro 25) y en algunos casos permanecen constante en las diferentes clases de sitio. Al analizar los Cuadros 3a al 5a del anexo, comprobamos que dichas variables ni siquiera presentan una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$) con el índice de sitio.

En general las texturas medias, con contenidos adecuados de materia orgánica y baja acidez, se encuentran en el ámbito adecuado para el crecimiento de las especies. La falta de valores extremos en las variables edáficas, no permitió encontrar plantaciones, en el área de estudio, en las cuales estos extremos se relacionaran con crecimientos deficientes o excelentes de las especies estudiadas.

El calcio a la primera profundidad del suelo, en las tres especies (Figura 20 a la Figura 22), tuvo una relación directa con el índice de sitio. Podemos observar (Cuadro 25), que

a medida que el contenido de calcio del suelo aumenta también el índice de sitio lo hace. Los coeficientes de correlación en todos los casos fueron altamente significativos ($P < 0.01$), con valores de ($r = 0.54$) para *T. grandis*, ($r = 0.39$) para *B. quinatum* y ($r = 0.46$) para *G. arborea*. Esto estaría confirmando lo encontrado por Vásquez y Ugalde (1994), quienes determinaron que el calcio era una variable explicativa en los modelos de predicción del índice de sitio para estas especies.

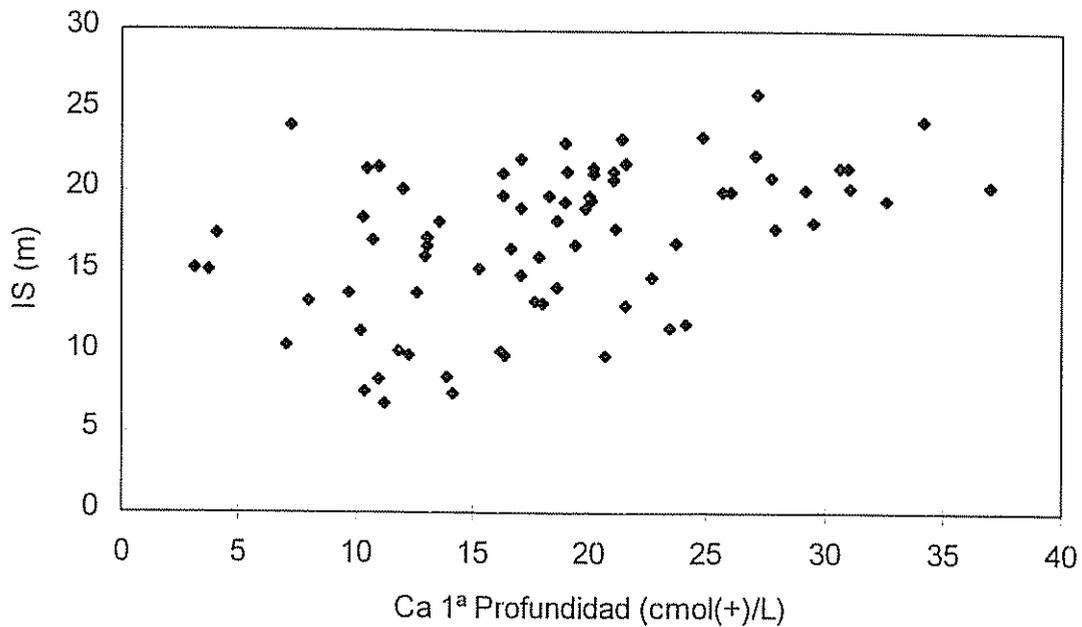


Figura 20: Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para *T. grandis*

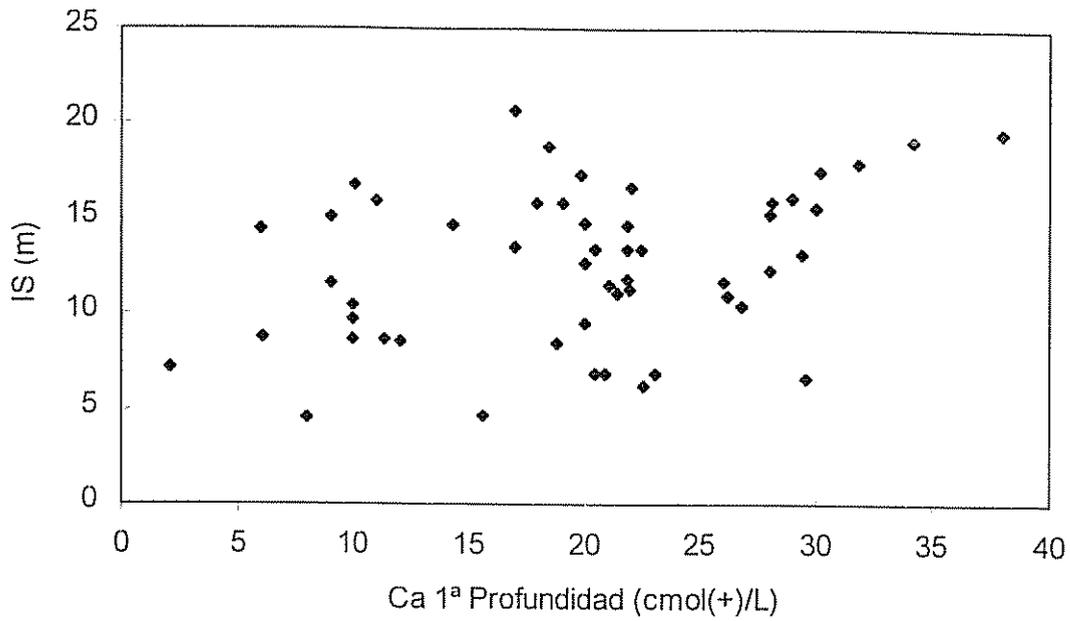


Figura 21: Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para *B. quinatum*

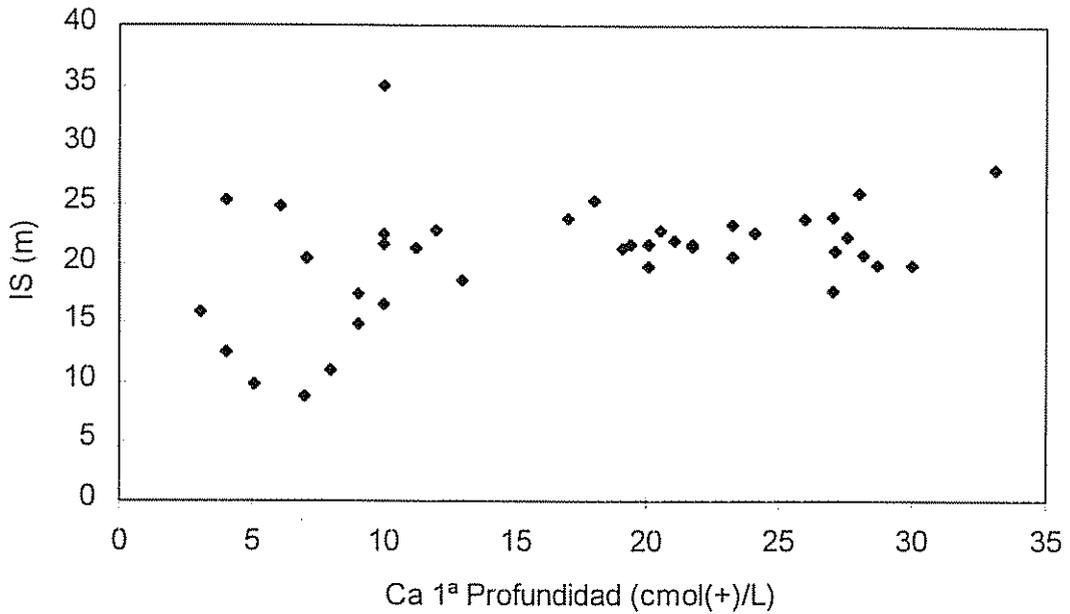


Figura 22: Relación entre calcio a la primera profundidad del suelo y el índice de sitio, para *G. arborea*

A la segunda profundidad del suelo solo *T. grandis* ($r = 0.60$) (Figura 23), presentó una relación altamente significativa ($P < 0.01$) entre el contenido de calcio a esa profundidad y el índice de sitio (Cuadro 3a del anexo). Estos datos indican que los requerimientos de calcio de las tres especies se satisfacen en su mayoría con un sistema radical superficial y en el caso de *T. grandis*, a profundidades mayores. En términos de extracción de nutrientes, *T. grandis* sería la especie que agotaría el sistema suelo más rápidamente, debiendo reconsiderarse su siembra en suelos con contenidos bajos de calcio, a fin de no deteriorar el ambiente.

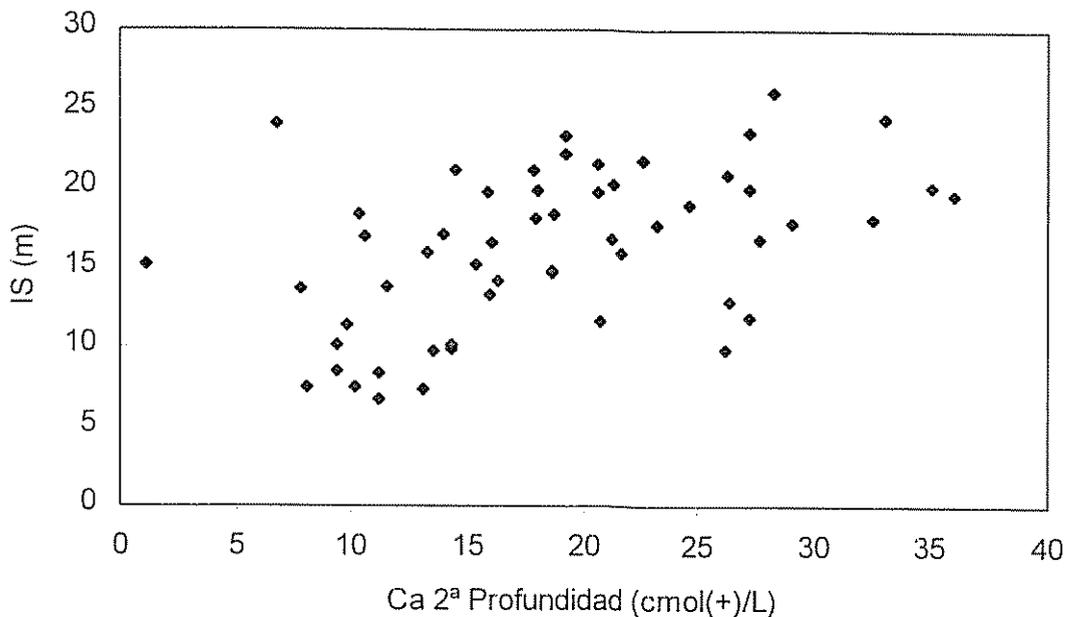


Figura 23: Relación entre calcio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para *T. grandis*

Estos resultados, confirmaron la suposición de que *T. grandis*, *B. quinatum* y *G. arborea* son especies basófilas, con altos requerimientos de calcio, para su adecuado desarrollo.

La variable que adicionó las bases (calcio, magnesio y potasio) fue incorporada al análisis, ya que en otros estudios ha sido incluida (Fassbender y Tschinkel, 1974; Courtin *et al.*, 1988) y habitualmente presenta una mejor correlación que sus

componentes por separado⁵. Sin embargo, en este caso los resultados fueron coincidentes con los descritos para el contenido de calcio (Cuadro 3a al 5a de anexo), el cual explica al menos el noventa por ciento de la variación de la suma de bases.

Los elementos magnesio y potasio a la segunda profundidad del suelo, solo presentaron un coeficientes de correlación ($r = 0.39$, $r = -0.36$, respectivamente) altamente significativos ($P < 0.01$) en relación al índice de sitio de *T. grandis* (Figura 24 y Figura 25). El resto de las especies no presentó una relación estadísticamente significativas ($P < 0.05$) entre estos elementos y el índice de sitio. Resultados similares al obtenido en la presente investigación, han sido descritos por Fassbender y Tschinkel (1974), Kabzems y Klinka (1987), Vásquez y Ugalde (1994) y Chavarria (1996), quienes señalan que el magnesio influía positivamente en la variación del índice de sitio, de las especies que ellos estudiaron. En relación al potasio, solo el estudio desarrollado por Alfaro (1983), muestra coincidencias con el resultado aquí alcanzado.

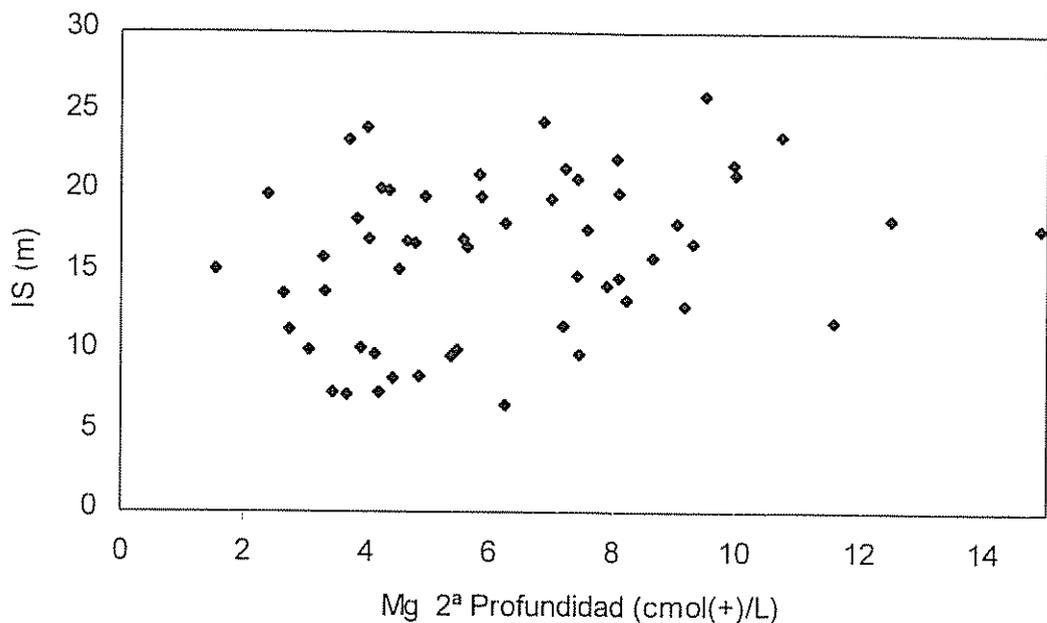


Figura 24: Relación entre magnesio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para *T. grandis*

⁵ ALVARADO, A. 1996. Suma de bases y su relación con el índice de sitio. CIA, San José, Costa Rica. Comunicación personal.

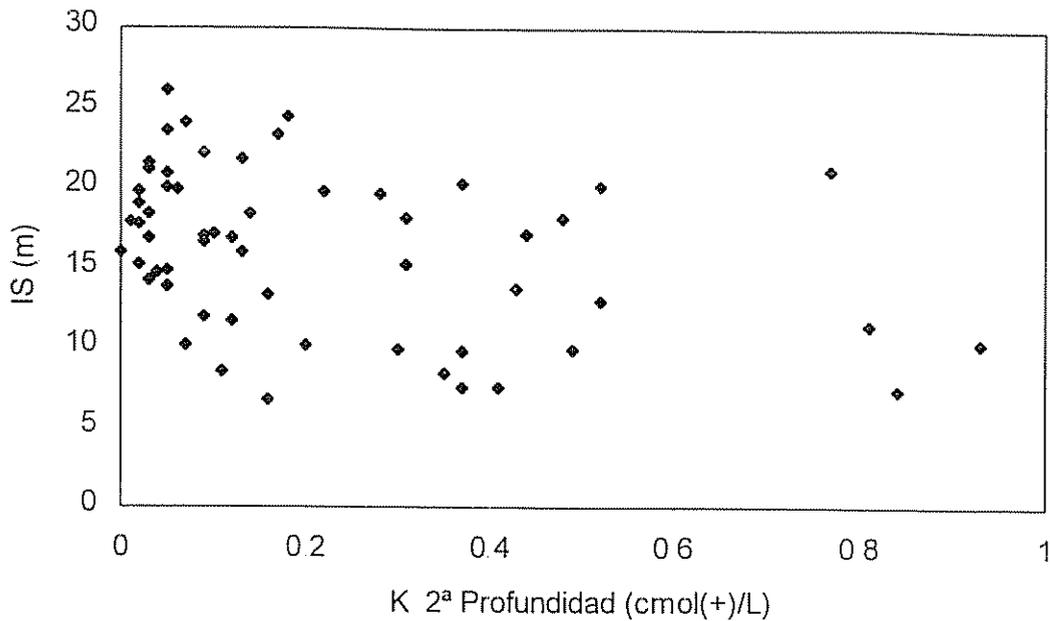


Figura 25: Relación entre potasio a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para *T. grandis*

El contenido de fósforo a la segunda profundidad del suelo, solo mostró una relación altamente significativa ($r = -0.76$) (Cuadro 5a del anexo) con el índice de sitio de *G. arborea* (Figura 26), indicando que mayores contenidos de este elemento entre 20 y 40 cm de profundidad del suelo, reducirían el índice de sitio. Esto concuerda con lo obtenido por Herrera (1996) en *Vochysia ferruginea*; sin embargo, otras investigaciones concluyen de forma antagónica, es decir un aumento del contenido de fósforo implicó un aumento del índice de sitio para *Cupressus lusitánica* (MILL) (Alfaro, 1983) y *Prosopis juliflora* (L.) D.C. y *Schizolobium parahybum* (Vell.) (Galloway, Alomoto y Maldonado, 1991).

A pesar de que la mayoría de los suelos contienen niveles de fósforo considerados bajos, el crecimiento de las tres especies no se vio afectado negativamente por este factor. Esta situación podría explicarse debido a que las especies tienen bajos requerimientos por este elemento o que su poder de asimilación es excelente. La última posibilidad podría estar asociada a la presencia de micorrizas.

El análisis de la Figura 26, permite señalar que la relación se presentó solo por la existencia de dos valores extremos, ya que el resto (la gran mayoría), permanece constante presentando un valor igual a cero. Debido a que no se presenta una tendencia satisfactoria entre los datos, esta variable fue excluida del análisis.

De este modo, *G. arborea* al igual que *B. quinatum*, no presentan variables a la segunda profundidad del suelo relacionada con la variación del índice de sitio.

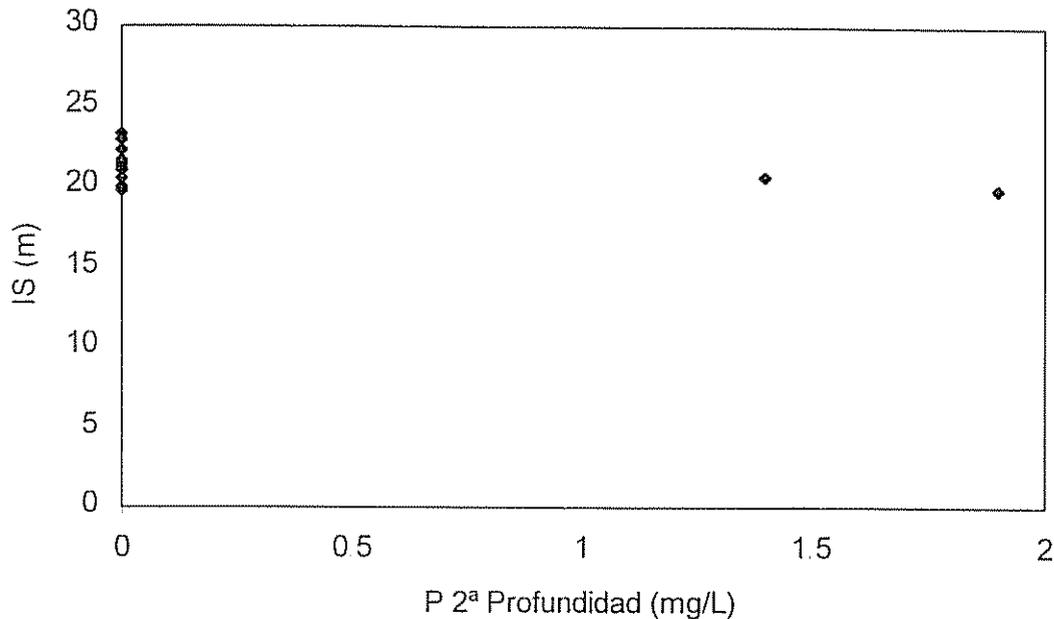


Figura 26: Relación entre fósforo a la segunda profundidad del suelo y el índice de sitio, para *G. arborea*

En la literatura citada, no se presentan reportes sobre una relación entre la resistencia a la penetración del suelo y la variación del índice de sitio, no obstante se supone que una mayor resistencia a la penetración (lo que implicaría un mayor grado de compactación del suelo), afectará de manera negativa el índice de sitio. Esta tendencia fue observada para *T. grandis* (Figura 27), donde se presentó una relación ($r = -0.58$) altamente significativa ($P < 0.01$) (Cuadro 3a del anexo)

Aunque la compactación del suelo ocurre debido a varios factores, el pisoteo por ganadería explica en mucho la presencia de suelos compactados en Guanacaste. En

forma indirecta, Zech *et al* (1995) consideraron esta variable como años de uso anterior del terreno, afectando negativamente el crecimiento de *G. arborea*.

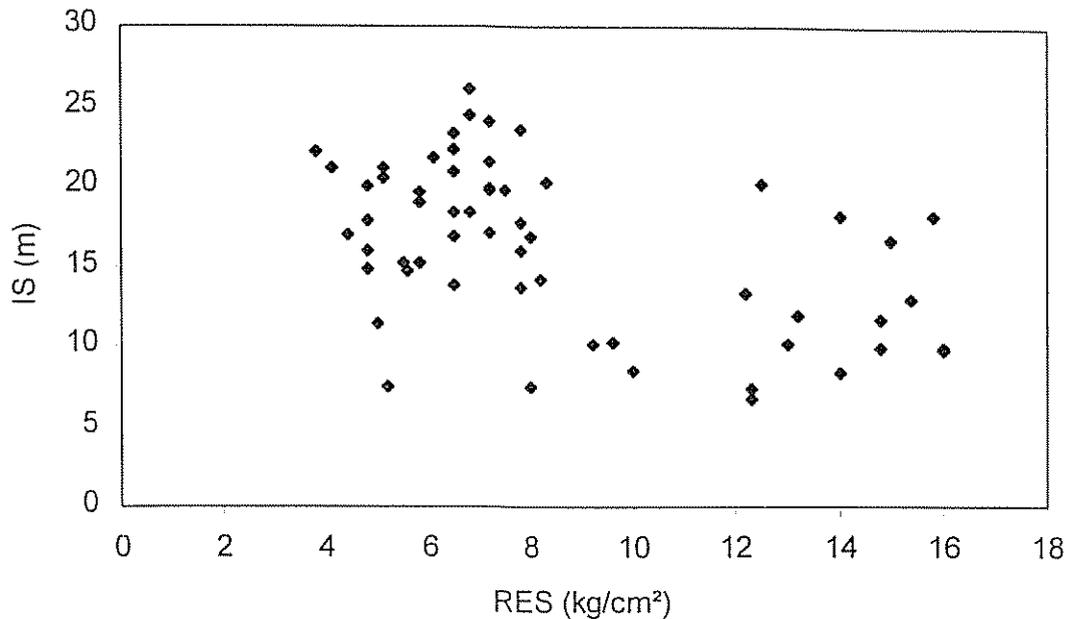


Figura 27. Relación entre resistencia a la penetración y el índice de sitio, para *T. grandis*

Al comenzar este acápite, se señaló que las muestras de suelos forestales podrían presentar problemas de interpretación, ya que las tablas de niveles críticos están hechas para cultivos agrícolas. En este caso y siempre dentro del rango 4-20 cmol(+)/L de calcio, se puede señalar que las tres especies bajo estudio, tienen un requerimiento promedio superior a 18 cmol(+)/L de calcio (Cuadro 25), para ser catalogados como sitios medios a excelentes.

6.3.3. Modelos predictivos del índice de sitio

Al usar el procedimiento de Stepwise, método de selección de variables (Gujarati, 1993), se obtuvo los modelos de predicción del índice de sitio. En la mayoría de los casos, las variables seleccionadas (Cuadro 26), coincidieron con las que presentaron la mayor correlación individual con el índice de sitio, siendo: pendiente (PEND), posición topográfica (PTOP), viento (VIENTO), calcio (Ca), resistencia a la penetración (RES),

temperatura media anual (TMA) y déficit hídrico (DEFHID). De estas variables, *T. grandis* se vio afectada por cuatro variables, *B. quinatum*, se vio afectada por dos variables, mientras que *G. arborea* se vio afectada por tres variables.

Cuadro 26: Variables que conforman los modelos predictivos del índice de sitio, seleccionadas a través del procedimiento Stepwise, según tipo de variable y especie

Tipo de variable	Variable	<i>T. grandis</i>	<i>B. quinatum</i>	<i>G. arborea</i>
Fisiográficas	PEND		-0.36 *	
	PTOP			0.60 **
	VIENTO			-0.54 **
Edáficas	CA	0.54 **	0.39 **	0.46 **
	RES	-0.56 **		
Climáticas	TMA	-0.47 **		
	DEFHID	-0.47 **		
Foliales	-	-	-	-

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% ($P < 0.01$)

* = estadísticamente significativo a un nivel de significancia del 5% ($P < 0.05$)

A pesar de que la variable que adicionaba calcio, magnesio y potasio, presentó resultados similares a los presentados por el contenido de calcio, solo esta última variable fue incorporada en todos los modelos, mediante el procedimiento Stepwise.

Tanto *B. quinatum*, como *G. arborea* no presentan variables estadísticamente significativas ($P < 0.05$) a la segunda profundidad del suelo, por lo tanto para estas especies solo fue posible obtener modelos considerando la primera profundidad del suelo.

Para *T. grandis*, podría pensarse que tampoco presenta variables significativas a la segunda profundidad del suelo, sin embargo la variable resistencia a la penetración solo fue medida para las parcelas incorporadas en esta investigación, las cuales coinciden con las que tienen un segunda profundidad del suelo, debido a esto esta variable se considera dentro del subgrupo de variables a una segunda profundidad del suelo, aunque en estricto rigor no lo sea.

La expresión final de los modelos predictivos del índice de sitio, se aprecia en el Cuadro 27, en tanto en el Cuadro 28, se observa el resumen general de los modelos (los resultados detallados se presentan en el Cuadro 6a del anexo).

Cuadro 27: Modelos predictivos del índice de sitio según profundidad del suelo y especie.

Especies	Profundidad del suelo	Modelos
<i>T. grandis</i>	1 ^a	IS = 25 432112 - 2 695521 DEFHID + 0.268667 Ca
	1 ^a + 2 ^a	IS = 119.007808 - 3.989583 TMA - 0.340751 RES + 0.341109 Ca
<i>B. quinatum</i>	1 ^a	IS = 11 044913 - 1.531195 Log (PEND) + 0.264734 Ca
<i>G. arborea</i>	1 ^a	IS = 15.509609 + 2.084607 PTOP - 2.334711 VIENTO + 0.188707 Ca

Al analizar el Cuadro 27, llama la atención que el elemento calcio en los primeros 20 cm de profundidad del suelo, está incorporado en todos los modelos. Podemos deducir que este nutriente, es fundamental en la expresión de la calidad de los sitios, para las especies estudiadas y debido a esto estas especies, reciben la denominación de basófilas. Se reportan estudios similares, donde el nivel de calcio ha sido significativo en la determinación del índice de sitio, tal es el caso de Kabzems y Klinka (1987) y Vásquez y Ugalde (1994).

Del análisis del Cuadro 28, podemos señalar que los modelos presentan una dependencia altamente significativa ($P < 0.01$) entre sus variables. Los valores del coeficiente de determinación, están dentro del rango obtenido en un sinnúmero de investigaciones similares a la desarrollada en este trabajo (Cuadro 1)

Cuadro 28: Resumen de los modelos de predicción de índice de sitio, según especie y profundidad del suelo para los modelos de predicción del índice de sitio.

Especie	Profundidad del suelo	Tamaño muestral	R ² ajustado	F
<i>T. grandis</i>	1 ^a	62	0.4863	29.87 **
	1 ^a + 2 ^a	45	0.6762	31.62 **
<i>B. quinatum</i>	1 ^a	42	:	11.49 **
<i>G. arborea</i>	1 ^a	32	0.5852	15.58 **

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1%, (P < 0.01)

Se comprobó el cumplimiento de los supuestos del método de los mínimos cuadrados (Cuadro 29), por lo tanto los modelos pueden ser utilizados con confianza.

Cuadro 29: Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos predictivos del índice de sitio, según especie y profundidad del suelo.

Especie	Profundidad del suelo	Supuestos de los residuos			
		Media igual cero t	Varianza homocedástica x ²	Distribución normal Kolmogorov	No hay autocorrelación D. Watson
<i>T. grandis</i>	1 ^a	-1.01E-9 **	0.710 **	0.056 **	1.833 **
	1 ^a + 2 ^a	-1.01E-9 **	2.351 **	0.086 **	2.165 **
<i>B. quinatum</i>	1 ^a	-2.34E-10 **	0.601 **	0.071 **	1.683 *
<i>G. arborea</i>	1 ^a	6.73E-10 **	3.917 **	0.143 **	1.888 **

** = altamente significativo, a un nivel de confianza del 1%, (P < 0.01)

* = estadísticamente significativo, a un nivel de confianza del 5% (P < 0.05)

6.4. Validación

Los modelos obtenidos en el presente estudio, fueron validados, determinando la precisión y la exactitud con que estimaban el índice de sitio, utilizando la submuestra de validación, ver acápite 5.3.2.4.

El procedimiento descrito por Vallejos (1979), permitió clasificar la precisión de los modelos (Cuadro 30), en base a la categorización del sesgo (en el Cuadro 7a, del

anexo, se detallada este análisis) En este caso solo un modelo es insesgado, el de la especie *G. arborea*, el resto presentan sesgo variable en sus estimaciones.

Según Freese (1960) y Vallejos (1979), la presencia de algún tipo de sesgo, no es tan decisiva en la exclusión del modelo, como lo es la exactitud. ya que si éste se presenta pero el modelo es exacto, hay medidas remediales que subsanan esta situación, tal como la predicción inversa descrita por Ostle (1973), citado por Vallejos (1979).

Cuadro 30: Clasificación del sesgo, en base al procedimiento descrito por Vallejos (1979), según especie y profundidad del suelo.

Especie	Profundidad del suelo	Constante de regresión igual cero (a = 0)	Coefficiente de regresión igual uno (b = 1)	Tipo de sesgo
<i>T. grandis</i>	1 ^a	1 469 n.s.	0.794 n.s.	Sesgo variable
	1 ^a + 2 ^a	0.977 n.s.	0.851 n.s.	Sesgo variable
<i>B. quinatum</i>	1 ^a	1.102 n.s.	0.897 n.s.	Sesgo variable
<i>G. arborea</i>	1 ^a	-1.481 **	1.087 **	Inssegado

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% (P < 0.01)

n s. = No significativo estadísticamente

Para nuestros propósitos, se desea que los modelos presenten una exactitud del 20% (por ejemplo, si un árbol mide 10 m, se aceptará un error máximo de 2 m, por lo tanto la estimación deberá estar contenida entre 8 y 12 m). En el Cuadro 31, se presenta la prueba de Freese (1960), donde observamos que el modelo propuesto para *G. arborea* es exacto e insesgado. En tanto, los modelos de *T. grandis* y *B. quinatum* además de presentar un sesgo variable son inexactos.

Cuadro 31: Exactitud de los modelos en base a la aplicación de la prueba de Freese (1960), según especie y profundidad del suelo

Especie	Profundidad del suelo	Valor Chi-cuadrado	Clasificación de la exactitud	Exactitud lograda
<i>T. grandis</i>	1ª	79.73 n.s.	Inexacto	37 %
	1ª + 2ª	40.65 n.s.	Inexacto	27 %
<i>B. quinatum</i>	1ª	28.75 n.s.	Inexacto	27%
<i>G. arborea</i>	1ª	6.21 **	Exacto	13%

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% (P < 0.01)

n.s = No significativo estadísticamente

Según Freese (1960) y Vallejos (1979), los modelos inexactos independientes del tipo de sesgo deben ser rechazados; sin embargo, en esta oportunidad a los modelos sesgados, se les eliminó la presencia de sesgos y serán propuestos todos los modelos, teniendo en consideración el grado de exactitud alcanzado, en espera de futuras funciones para estas especies, que logren una mayor precisión y exactitud de las aquí obtenidas.

Los posibles usuarios de estas funciones tendrán una estimación del índice de sitio en lugares donde no hay plantaciones establecidas de *T. grandis* y/o *B. quinatum* y/o *G. arborea* y bajo su responsabilidad y criterio podrán o no, usar los modelos propuestos en esta investigación.

A continuación serán descritos los modelos libre de sesgos para todas las especies:

T. grandis, primera profundidad del suelo, 37% de exactitud

$$IS = \frac{25.432112 - 2.695521 \text{ DEFHID} + 0.268667 \text{ Ca}}{0.794}$$

T. grandis, primera y segunda profundidad del suelo, 27% de exactitud

$$IS = \frac{118.03081 - 3.989583 \text{ TMA} - 0.340751 \text{ RES} + 0.341109 \text{ Ca}}{0.851}$$

B. quinatum, primera profundidad del suelo, 27% de exactitud

$$IS = \frac{9.942913 - 1.531195 \text{ Log (PEND)} + 0.264734 \text{ Ca}}{0.897}$$

G. arborea, primera profundidad del suelo, 13% de exactitud.

$$IS = 15.509609 + 2.084607 \text{ PTOPO} - 2.334711 \text{ VIENTO} + 0.188707 \text{ Ca}$$

6.5. Análisis foliar

En el Cuadro 32, aparece el resumen de las estadísticas descriptivas del análisis foliar realizado en las tres especies. Este análisis, se realizó exclusivamente con aportes de empresas privadas, por lo tanto el tamaño muestral, estuvo condicionado a la disponibilidad de financiamiento por parte de dichas empresas. Presentándose un número de unidades muestrales reducido (*T. grandis* = 13, *B. quinatum* = 15 y *G. arborea* = 1).

El caso extremo lo representa *G. arborea*, donde solo fue posible obtener una muestra foliar. Esta observación no fue eliminada del análisis, ya que sirve para tener una vaga noción sobre, el estado nutricional de esta especie en la finca Río Tabaco. Los valores obtenidos, no tienen un comportamiento anormal, ya que fluctúan dentro del rango de variación de un estudio similar llevado a cabo por Sturmman, Bergmann y Zech (1994), para la misma especie en la parte Atlántica norte de Costa Rica. Conociendo las limitaciones que tiene el comparar los resultados de solo una unidad muestral con los niveles críticos publicados en la literatura (Cuadro 3), podemos indicar que el estado nutricional de *G. arborea* varía de intermedio a alto.

Adicionalmente Sturmman, Bergmann y Zech (1994), indican que habitualmente en Costa Rica, se presentan deficiencias de potasio, al presentarse una relación antagónica con el magnesio, observándose la mayor parte del tiempo cocientes entre estos elementos inferiores a 0.26. En nuestro caso el valor de este cociente es 4.25, superando ampliamente el límite citado, por lo tanto podemos señalar que no hay

deficiencias de potasio asociado a *G. arborea* en la parcela muestreada en el sitio Río Tabaco.

Al comparar los resultados del Cuadro 32, con la recopilación hecha por Drechsel y Zech (1991) (Cuadro 2), podemos indicar que el estado nutricional de *T. grandis*, varía de intermedio a alto en los sitios Río Tabaco y Garza, en tanto se presentan signos de deficiencia a un estado nutricional bajo en el sitio Bagaces. La literatura no reporta niveles críticos para *B. quinatum*, por lo que esta investigación podría considerarse pionera en este sentido, aportando información valiosa para esta especie.

En general, las tres especies absorben cantidades totales (unidades de Ca+Mg+K+P) similares, aunque los requerimientos parecen ser diferentes, por ejemplo, *T. grandis* absorbe $K \gg Ca \gg Mg = P$, *B. quinatum* absorbe $K > Ca \gg Mg > P$ y *G. arborea* absorbe $K = Ca \gg Mg = P$.

Cuadro 32: Resumen de las estadísticas descriptivas del análisis foliar según especie, nutrimento y sitio (edades 2 - 5 años)

Especie	Nutriente foliar	Sitio	N	Mínimo	Media	Máximo
<i>T. grandis</i>	Ca	Bagaces	4	0,42	0,53	0,78
		Garza	4	0,81	0,95	1,19
		Río Tabaco	5	0,94	1,13	1,36
	Mg	Bagaces	4	0,08	0,16	0,22
		Garza	4	0,24	0,30	0,34
		Río Tabaco	5	0,24	0,28	0,33
	K	Bagaces	4	0,84	1,45	1,76
		Garza	4	1,53	1,68	1,92
		Río Tabaco	5	1,31	1,66	2,38
	P	Bagaces	4	0,10	0,18	0,23
		Garza	4	0,19	0,27	0,29
		Río Tabaco	5	0,16	0,22	0,26
<i>B. quinatum</i>	Ca	Garza	10	0,81	1,00	1,36
		Río Tabaco	5	0,98	1,11	1,19
	Mg	Garza	10	0,28	0,32	0,39
		Río Tabaco	5	0,37	0,39	0,41
	K	Garza	10	0,87	1,13	1,28
		Río Tabaco	5	0,76	1,10	1,28
	P	Garza	10	0,20	0,27	0,32
		Río Tabaco	5	0,17	0,24	0,30

Continuación ...

Cuadro 32: Resumen de las estadísticas descriptivas del análisis foliar según especie, nutrimento y sitio (edades 2 - 5 años)

Especie	Nutriente foliar	Sitio	N	Mínimo	Media	Máximo
<i>G. arborea</i>	Ca	Río Tabaco	1		1.5	
	Mg	Río Tabaco	1		0.4	
	K	Río Tabaco	1		1.7	
	P	Río Tabaco	1		0.3	

Interesaba relacionar el estado nutricional foliar tanto de *T. grandis*, como de *B. quinatum* con el índice de sitio, asumiendo que existiría una relación lineal positiva y en segundo término intentar comprender el ciclaje de nutrientes entre el sistema suelo y los árboles.

Antes de indagar en este sentido, fue preciso plantearse previamente tres interrogantes, las cuales fueron dilucidadas a través de análisis de varianza y la prueba SNK de comparaciones múltiples. En el Cuadro 8a del anexo, se presenta el análisis de varianza detallado:

- ¿Entre lotes dentro de un sitio se presentan al menos diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) en el estado nutricional entre árboles?
- ¿Se presentan al menos diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) en el estado nutricional entre los sitios?
- ¿Habrá un efecto de la edad sobre el estado nutricional de los árboles?

Los resultados del análisis indican que entre lotes de un mismo sitio no se presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) (Cuadro 33). La excepción la constituye el elemento potasio para *T. grandis*, donde uno de los lotes presenta diferencia en el contenido promedio nutricional. Sin embargo, debido a que esto aparentemente no representa una tendencias general, se puede señalar que los sitios poseen condiciones homogéneas en cuanto a su contenido nutricional. Esta

aseveración es muy importante, ya que se puede entonces hacer conjeturas sobre los diferentes sitios, con mayor certeza

Cuadro 33: Comparación del contenido nutricional foliar entre lotes de un mismo sitio mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio.

Tipo de análisis	Especie	Sitios		Ca	Mg	K	P
Análisis de varianza (VALOR F)	<i>T. grandis</i>	Bagaces		0.49 n.s.	0.11 n.s.	0.50 n.s.	0.43 n.s.
		Río Tabaco		2.02 n.s.	3.85 n.s.	31.52 *	0.42 n.s.
	<i>B. quinatum</i>	Garza		2.71 n.s.	1.48 n.s.	2.50 n.s.	2.64 n.s.
Prueba de comparaciones múltiples (SNK)	Especie	Sitios	Lote	Ca	Mg	K	P
	<i>T. grandis</i>	Bagaces	2	0.63 a	0.15 a	1.20 a	0.15 a
			3	0.42 a	0.20 a	1.64 a	0.17 a
			1	0.42 a	0.14 a	1.76 a	0.23 a
		Río Tabaco	17	1.36 a	0.33 a	2.38 a	0.18 a
			18	1.08 a	0.26 a	1.38 b	0.22 a
			19	1.06 a	0.28 a	1.79 a b	0.18 a
	<i>B. quinatum</i>	Garza	4-9	1.36 a	0.29 a	1.17 a	0.23 a
			2-2	1.06 a	0.39 a	1.24 a	0.32 a
			3-15	1.02 a	0.35 a	0.87 a	0.20 a
			1-3	0.98 a	0.32 a	1.16 a	0.30 a
			4-7	0.94 a	0.29 a	1.10 a	0.28 a
			3-4	0.94 a	0.35 a	1.10 a	0.26 a
			1-7	0.94 a	0.33 a	1.28 a	0.29 a
			3-3	0.90 a	0.29 a	1.12 a	0.25 a

* = estadísticamente significativo, a un nivel de significancia del 5%, ($P < 0.05$)

n.s. = no significativo estadísticamente

Letras iguales indican valores estadísticamente similares

La desigualdad entre los sitios (Cuadro 34), fue estadísticamente diferente ($P < 0.05$) en el contenido de calcio y/o magnesio foliar, ya que los contenidos de potasio y fósforo no presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$).

En *T. grandis*, la diferencia está dada por el sitio Bagaces, el cual exhibe tanto en calcio como magnesio foliar, la menor absorción de estos elementos. En *B. quinatum*, solo se presenta diferencia en el contenido de magnesio foliar, siendo el sitio Río Tabaco, el que presenta la menor absorción de este elemento.

Cuadro 34: Comparación del contenido nutricional foliar entre sitios mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio

Tipo de análisis	Especie	Sitios	Ca	Mg	K	P
Análisis de varianza (VALOR F)	<i>T. grandis</i>	Río Tabaco	15.29 **	10.49 **	0.48 n.s.	3.18 n.s.
		Garza				
		Bagaces				
	<i>B. quinatum</i>	Río Tabaco	2.23 n.s.	15.57 **	0.11 n.s.	1.00 n.s.
		Garza				
Prueba de comparaciones múltiples (SNK)	<i>T. grandis</i>	Río Tabaco	1.13 a	0.28 a	1.66 a	0.22 a
		Garza	0.95 a	0.30 a	1.68 a	0.27 a
		Bagaces	0.53 b	0.16 b	1.45 a	0.18 a
	<i>B. quinatum</i>	Río Tabaco	1.11 a	0.32 b	1.10 a	0.24 a
		Garza	1.00 a	0.39 a	1.13 a	0.27 a

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% ($P < 0.01$)

n.s. = no significativo estadísticamente

Letras iguales indican valores estadísticamente similares

Es plausible suponer, que una especie tendrán requerimientos propios de concentración foliar para desarrollar sus funciones fisiológicas. De producirse diferencias de crecimiento, la causa probable será una inadecuada absorción por parte de la planta de un elemento en particular, ya sea por que el suelo presente deficiencias del elemento o por que habiendo suficiente cantidad esta no se encuentre disponible para la planta (por ejemplo por sequía) o que debido a la excesiva cantidad, el elemento se torne tóxico.

En el caso del sitio de Bagaces, se presenta un bajo contenido de calcio y magnesio en las hojas (Figura 28, Figura 29, Figura 32 y Figura 33) no por que el suelo presente deficiencias, como aparentemente podría interpretarse, sino más bien que dichos nutrimentos se encuentran férreamente fijados y el método de extracción utilizado en laboratorio, solo refleja la cantidad total disponible para las plantas (Bertsch, 1987).

Es importante hacer notar, que de acuerdo a lo planteado en el Cuadro 24, casi la totalidad de los suelos muestreados presentan un bajo contenido de fósforo, y en promedio un 52% presenta un bajo contenido de potasio. Sin embargo, el contenido foliar para ambas especies de estos elementos en los sitios Garza y Río Tabaco (al

menos en *T. grandis*, los contenidos foliares se consideran intermedios a altos (Cuadro 2)), no presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$), entre lotes de un mismo sitio, entre los diferentes sitios y entre edades (Cuadro 35), lo que significa que a pesar de presentarse un bajo contenido de estos nutrimento en el suelo, tanto *T. grandis*, como *B. quinatum*, satisfacen sus demandas nutricionales (sus niveles foliares se consideran de intermedios a altos (Cuadro 2)) por estos elementos y dichas demandas son muy similares entre ambas especies. Esto indicaría que algunas especies arbóreas, tolerarían niveles críticos inferiores a los utilizados tradicionalmente en cultivos agrícolas.

En *T. grandis*, la única edad que presentó diferencias tanto en calcio como magnesio estadísticamente significativas ($P < 0.05$), corresponde a 3.3 años, que en su totalidad pertenece al sitio Bagaces, por lo tanto la diferencia se debe a la influencia del sitio más que a la edad. En *B. quinatum*, el magnesio presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$), pero no se aprecia una tendencia clara al respecto, como para obtener resultados confiables.

Cuadro 35: Comparación del contenido nutricional foliar por edad, mediante análisis de varianza y prueba SNK, según especie y sitio

Tipo de análisis	Especie	Edad (años)	Ca	Mg	K	P
Análisis de varianza (VALOR F)	<i>T. grandis</i>	3.6	13.88 **	6.56 *	0.31 n.s.	2.15 n.s.
		2.5				
		1.8				
		3.3				
	<i>B. quinatum</i>	4.9	0.94 n.s.	13.58 **	0.53 n.s.	0.53 n.s.
		3.9				
		1.9				
		3.0				
		3.1				
Prueba de comparaciones múltiples (SNK)	<i>T. grandis</i>	3.6	1.15 a	0.28 a	1.63 a	0.21 a
		2.5	1.13 a	0.31 a	1.71 a	0.27 a
		1.8	0.87 a b	0.28 a	1.69 a	0.26 a
		3.3	0.53 b	0.16 b	1.45 a	0.18 a
	<i>B. quinatum</i>	4.9	1.12 a	0.38 a	1.17 a	0.26 a
		3.9	1.09 a	0.41 a	1.01 a	0.23 a
		1.9	1.04 a	0.31 b	1.17 a	0.28 a
		3.0	1.01 a	0.36 a	1.07 a	0.26 a
		3.1	0.90 a	0.29 b	1.12 a	0.25 a

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% ($P < 0.01$)

* = estadísticamente significativo, a un nivel de significancia del 5%, ($P < 0.05$)

n.s. = no significativo estadísticamente

Letras iguales indican valores estadísticamente similares

Una vez, respondidas las tres interrogantes planteadas, se relacionó el contenido nutricional foliar con el índice de sitio (Cuadro 3a al 5a del anexo), donde se comprobó que para las condiciones muestreadas en este estudio no hubo una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$). También los contenidos nutricionales se relacionaron con variables edáficas y con los mismos contenidos foliares (Cuadro 3a al 5a del anexo), donde los resultados fueron más alentadores. En el Cuadro 36, aparece un resumen de las correlaciones significativas entre las variables:

Cuadro 36: Coeficiente de correlación entre el porcentaje de contenido foliar y variables explicativas según especie.

Especie	Variable	Contenido nutricional foliar			
		Ca _f	Mg _f	K _f	P _f
<i>T. grandis</i>	IS	0.42 n.s.	0.44 n.s.	0.36 n.s.	0.44 n.s.
	Limo	0.87 **	0.82 **		
	Ca _s	0.54 *	0.64 *		
	P _s				0.55 *
	Mg _f	0.81 **			
<i>B. quinatum</i>	IS	-0.21 n.s.	-0.29 n.s.	0.28 n.s.	0.25 n.s.
	Limo	-0.52 *			0.54 *
	Ca _s	-0.07 n.s.	-0.55 *		
	K _s			0.64 **	

** = altamente significativo, a un nivel de significancia del 1% ($P < 0.01$)

* = estadísticamente significativo, a un nivel de significancia del 5%, ($P < 0.05$)

n.s. = no significativo estadísticamente

Al observar el Cuadro 36, aparentemente se presentan resultados contradictorios entre ambas especies, ya que mientras las relaciones en *T. grandis*, son todas positivas, en *B. quinatum*, se presentan algunas negativas. Esto se debió a que en *T. grandis*, el sitio Bagaces era extremo y ayudaba a la visualización global de tendencias entre las variables, en tanto las variables foliares de los sitios analizados para *B. quinatum*, en la mayoría de los casos (Cuadro 34 y Cuadro 35), eran estadísticamente similares, lo que dificultaba la visualización de tendencias adecuadas.

Se generaron modelos (Cuadro 37), entre las variables que presentaron una relación estadística positiva (Cuadro 36), para intentar comprender el ciclaje de nutrientes. Todos los modelos, presentaron una dependencia lineal altamente significativa ($P < 0.01$) entre las variables dependientes e independientes (Cuadro 38), además todos los modelos cumplieron con los supuestos del método de mínimos cuadrados (Cuadro 39). En el cuadro 9a del anexo, se presenta el detalle de los resultados estadísticos.

Cuadro 37: Modelos de predicción del contenido foliar nutricional, según especie y nutrimento estimado.

Especie	Modelo n°	Expresión
<i>T. grandis</i>	[1]	$Ca_f = 0.028899 \text{ Limo}$
	[2]	$Mg_f = -1.170198 + 0.084556 \text{ Limo} - 0.001217 \text{ Limo}^2$
	[3]	$Ca_f = 0.043077 Ca_s$
	[4]	$Mg_f = 0.012114 Ca_s$
	[5]	$Ca_f = 3.552798 Mg_f$
	[6]	$P_f = 0.047168 P_s$
<i>B. quinatum</i>	[7]	$K_f = 0.898761 + 1.171358 K_s - 0.950785 K_s^2$
	[8]	$P_f = 0.007848 \text{ Limo}$

Cuadro 38: Análisis de varianza y de correlación para los modelos predictivos del contenido nutricional foliar, según especie y modelo

Especie	Modelo n°	F	Error estándar de estimación	r ² ajustado
<i>T. grandis</i>	[1]	328.47 **	0.1828	0.9648
	[2]	24.49 **	0.0340	0.7965
	[3]	126.08 **	0.2870	0.9131
	[4]	201.44 **	0.0639	0.9190
	[5]	338.31 **	0.1802	0.9657
	[6]	25.97 **	0.1329	0.6840
<i>B. quinatum</i>	[7]	10.30 **	0.0952	0.6318
	[8]	754.70 **	0.0367	0.9818

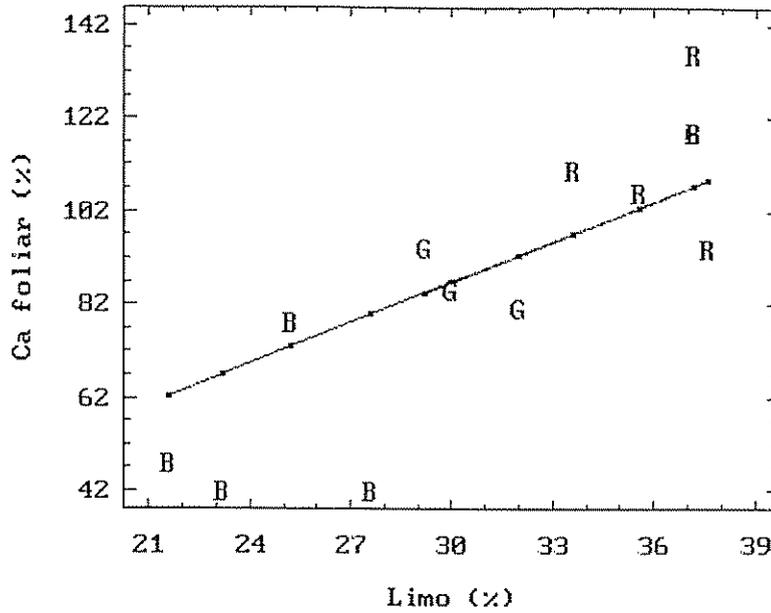
Cuadro 39: Comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados, para los modelos predictivos del contenido nutricional foliar, según especie y modelo.

Especie	Modelo n°	Supuestos de los residuos			
		Media igual cero: t	Varianza homocedástica x2	Distribución normal Kolmogorov	No hay autocorrelación: D Watson
<i>T. grandis</i>	[1]	-0.33**	0.72**	0.14**	2.53**
	[2]	-6.66E-14**	0.04**	0.17**	2.28**
	[3]	0.38**	1.26**	0.12**	1.34**
	[4]	0.42**	0.11**	0.14**	1.37**
	[5]	0.12**	3.40**	0.17**	1.55**
	[6]	1.11**	0.87**	0.16**	1.34**
<i>B. quinatum</i>	[7]	1.72E-14**	0.03**	0.18**	2.23**
	[8]	0.11**	0.01**	0.13**	2.13**

** = Altamente significativo, a un nivel de significancia de 1% ($p < 0.01$)

La relación entre porcentaje de limo en el suelo y contenido foliar de calcio para *T. grandis* (Figura 28, modelo [1]), magnesio para *T. grandis* (Figura 29, modelo [2]) y fósforo para *B. quinatum* (Figura 30, modelo [8]), se presenta ya que este constituyente del suelo contribuye con dichos elementos quedando disponibles para la absorción de las plantas.

(x 0.01)

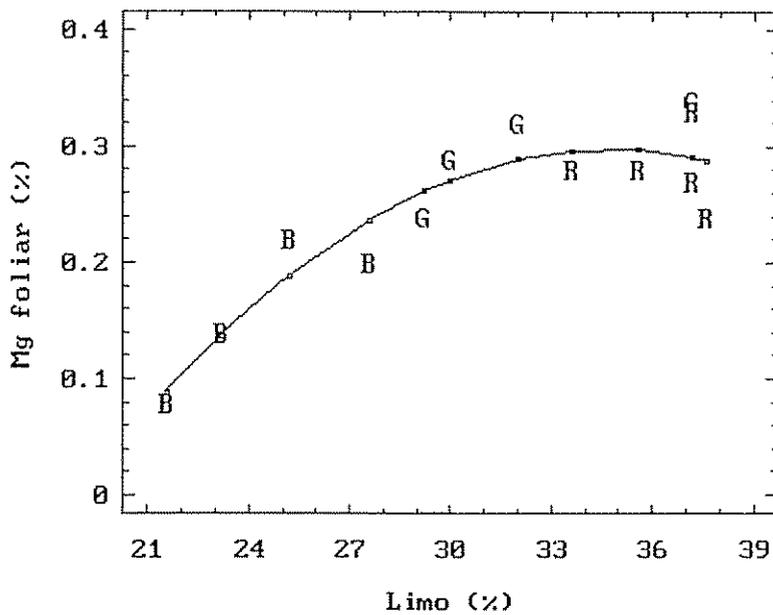


Sitios

B=Bagaces
G=Garza
R= Río Tabaco

r^2 adj. = 0.96

Figura 28: Relación entre el contenido de limo del suelo y el contenido de calcio foliar en *T. grandis*.



Sitios

B=Bagaces
G=Garza
R= Río Tabaco

r^2 adj. = 0.80

Figura 29: Relación entre el contenido de limo en el suelo y el contenido de magnesio foliar en *T. grandis*.

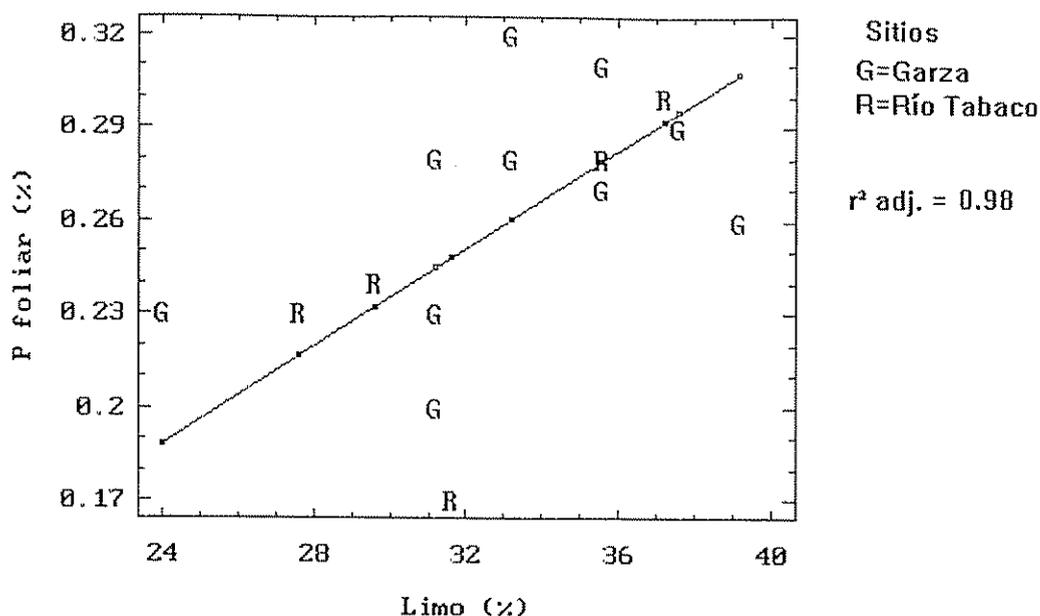
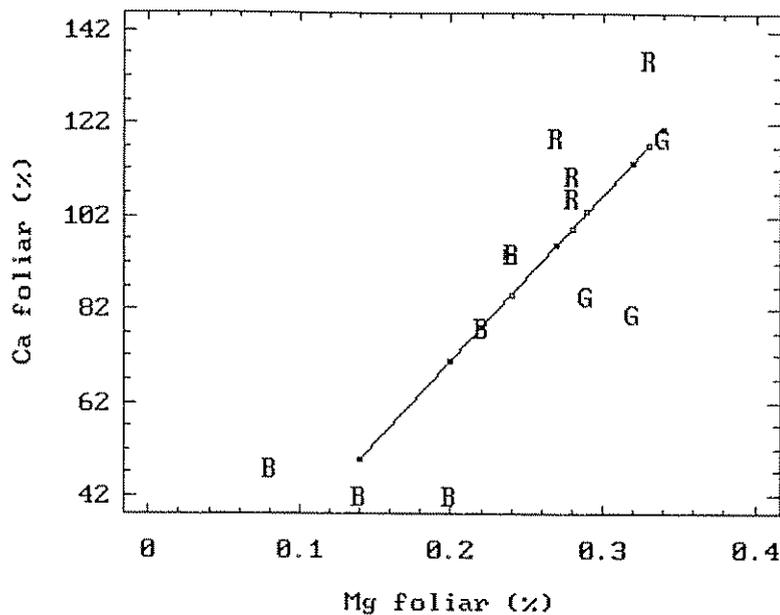


Figura 30: Relación entre el contenido de limo y contenido de fósforo foliar en *B. quinatum*.

Para *T. grandis* se presenta una relación lineal altamente significativa (Figura 28), entre el limo y el contenido de calcio foliar, en tanto el elemento magnesio (Figura 29) presenta una relación cuadrática (llega a un cierto nivel y empieza a decrecer el contenido foliar), lo que podría significar que la absorción de magnesio se ve disminuida a niveles altos de calcio en el suelo. Se reporta que el origen del antagonismo, se presenta entre nutrimentos estructuralmente similares (es el caso del calcio y el magnesio) al interferirse físicamente y competir por los mismos puntos de absorción (Bertsch, 1995).

Para comprobar la existencia de antagonismo, se relacionó el contenido de magnesio foliar y calcio foliar para *T. grandis* (Figura 31, modelo [4]), observando que se presenta una relación lineal positiva, lo que sugiere una relación ascendente constante entre los nutrimentos, produciéndose un balance entre ellos. Por lo tanto la causa del descenso del contenido de magnesio por sobre el umbral, no sería su relación antagónica con el calcio.

(X 0.01)



Sitios

B=Bagaces

G=Garza

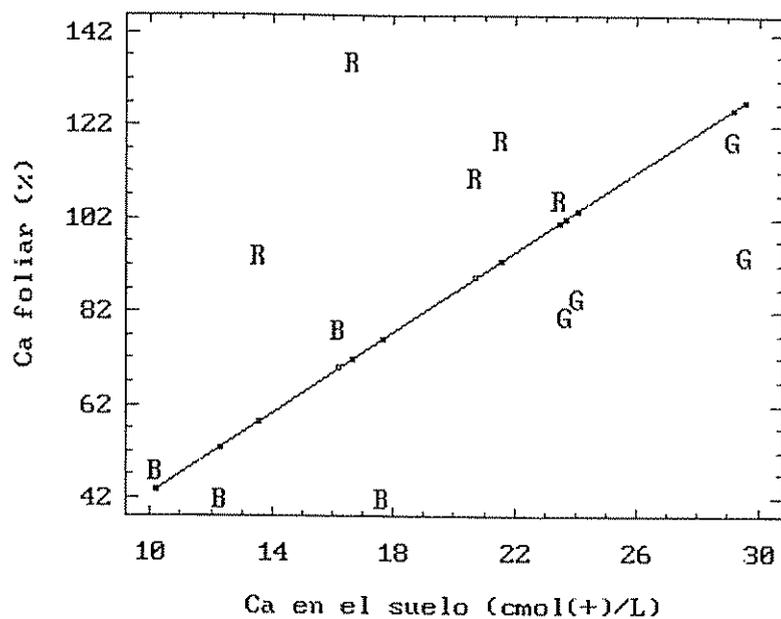
R=Río Tabaco

r^2 adj. = 0.97

Figura 31: Relación entre el contenido de magnesio foliar y el contenido de calcio foliar, en *T. grandis*

El calcio del suelo (variable predictiva del índice de sitio, para las tres especies), se relaciona de manera positiva (Cuadro 36) tanto con el contenido de calcio foliar, como el contenido de magnesio foliar para *T. grandis* (Figura 32., modelo [3] y Figura 33, modelo [4]), en tanto para *B. quinatum* lo hace de manera negativa. La aparente contradicción de los resultados tiene su origen, tal como se señaló con anterioridad, en la inexistencia de sitios extremos muestreados para *B. quinatum* .

($\times 0.01$)



Sitios

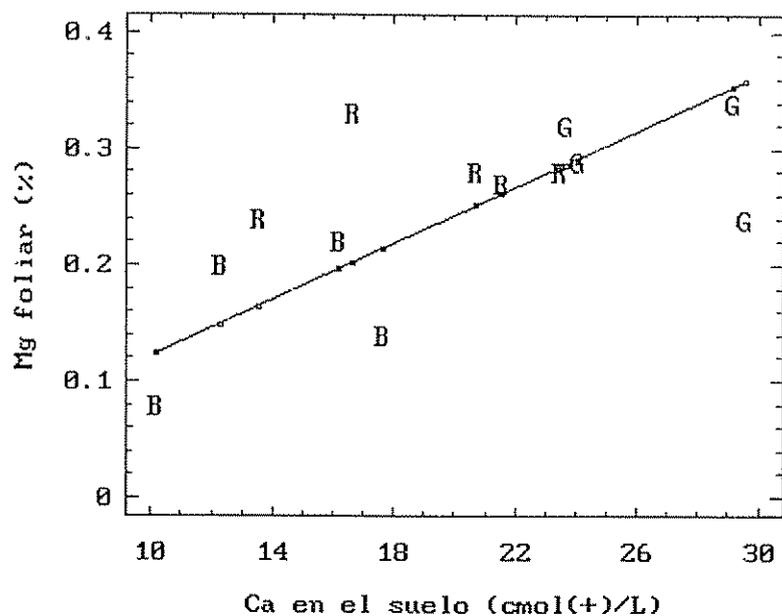
B=Bagaces

G=Garza

R=Río Tabaco

r^2 adj.=0.91

Figura 32: Relación entre contenido de calcio en el suelo y contenido de calcio foliar en *T. grandis*



Sitios

B=Bagaces

G=Garza

R=Río Tabaco

r^2 adj. = 0.94

Figura 33: Relación entre contenido de calcio en el suelo y contenido de magnesio foliar en *T. grandis*

De las dos figuras anteriores (Figura 32 y Figura 33), se comprueba lo que la literatura señala en relación a la mayor disponibilidad de calcio, ya que por cada Mg absorbido por la planta, al menos se absorben 2 ó 3 de calcio (Bertsch, 1995)

Tanto el fósforo del suelo para *T. grandis* (Figura 34, modelo [6]), como el potasio del suelo para *B. quinatum* (Figura 35, modelo [7]), se relacionan de manera positiva (Cuadro 36) con sus homólogos foliares, y el proceso de absorción es muy eficiente, ya que mientras el suelo presenta deficiencias en la mayoría de los suelos (Cuadro 24), los contenidos foliares se consideran intermedios a altos (Cuadro 2).

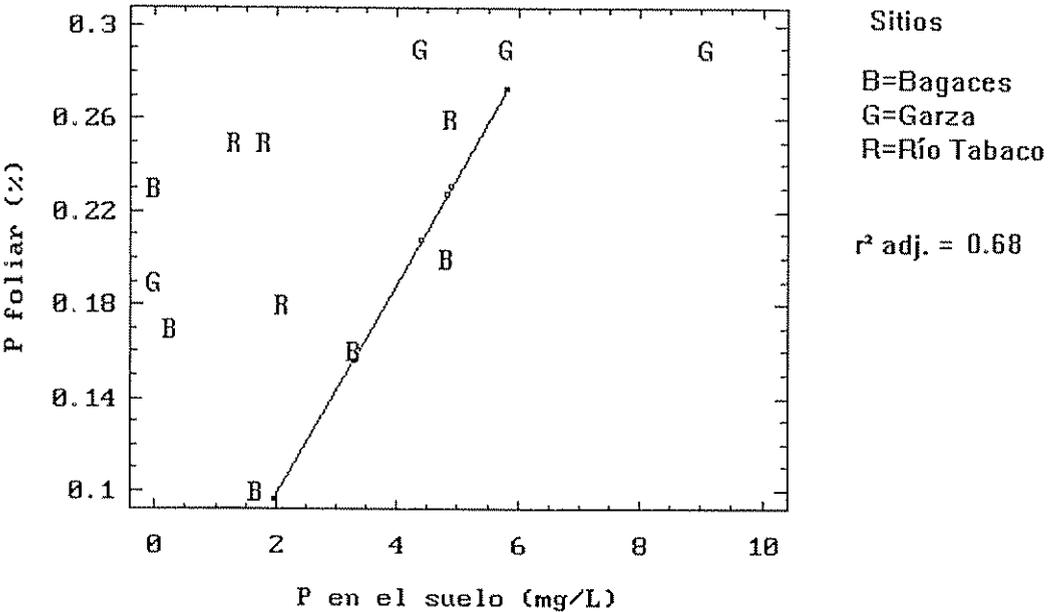


Figura 34: Relación entre contenido del suelo y foliar de fósforo en *T. grandis*

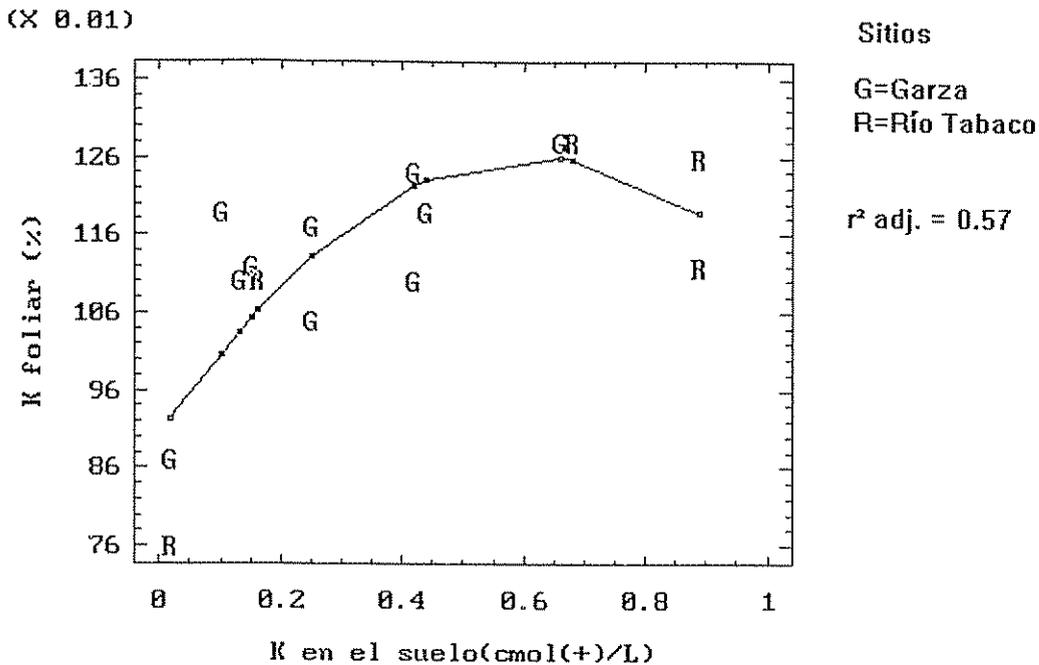


Figura 34: Relación entre contenido del suelo y foliar de potasio en *B. quinatum*

Al analizar la Figura 34, observamos que a partir de un cierto nivel, aproximadamente 0.5 cmol(+)/L, se produce un "consumo de lujo", zona en la que a pesar de aumentar la concentración de nutrimento en el suelo, no aumenta el contenido foliar del elemento (Bertsch, 1995).

6.6. Procedencia

La evaluación del ensayo de seis procedencias de *T. grandis*, dio como resultado (Cuadro 40) que a los siete años de edad, tanto los incrementos diamétricos como los de volumen total no presentaron diferencias estadísticamente significativas, pero el incremento en altura si presentó diferencias altamente significativas ($P < 0.01$). En el Cuadro 10a, se muestra la tabla de análisis de varianza detallada.

Cuadro 40: Resultado del análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples SNK, del ensayo procedencias de *T. grandis* de siete años, en Barra Honda, provincia de Guanacaste, Costa Rica.

Estadígrafos	Variables analizadas					
	IMA Diamétrico (cm/año)		IMA Altura (m/año)		IMA V 1 (m ³ /ha/año)	
Análisis de varianza (VALOR F)	2.14 n.s.		3.39 *		0.91 n.s.	
Prueba de comparaciones múltiples (SNK)	Procedencia	IMA Diamétrico (cm/año)	Procedencia	IMA Altura (m/año)	Procedencia	IMA V 1 (m ³ /ha/año)
	Puntareanas	2.76 a	Quepos	1.96 a	Zam BAH	12.70 a
	Zam BAH	2.75 a	El Salvador	1.87 a b	Puntareanas	12.42 a
	Q. Negra	2.72 a	Zam BAH	1.87 a b	Q. Negra	11.53 a
	ZIC SPA1	2.63 a	ZIC SPA1	1.84 a b	ZIC SPA1	11.42 a
	Quepos	2.48 a	Puntareanas	1.79 a b	Quepos	11.41 a
	El Salvador	2.40 a	Q. Negra	1.71 b	El Salvador	9.64 a

* = Estadísticamente significativo, a un nivel de significancia de 5% ($p < 0.05$)

n.s. = Estadísticamente no significativo

Letras iguales, no denotan diferencias estadísticamente significativas

En función de los resultados obtenidos, se recomienda la procedencia de Quepos (Costa Rica) y Puntareanas (Costa Rica), a aquellos propietarios interesados en iniciar programas de reforestación en la provincia de Guanacaste. Esta recomendación tiene su fundamento ya que estas procedencias entre sí no presentan diferencias estadísticamente significativas y por ser procedencias del país la disponibilidad de semillas será más propicia

Pudiera parecer que la edad del ensayo, no es suficiente para hacer recomendaciones sobre plantaciones a gran escala, utilizando la procedencia de Quepos; sin embargo, al parecer⁶ este es uno de los pocos ensayos de este tipo en el país, por lo tanto los resultados obtenidos se tornan más relevantes al desconocer otros ensayos de mayor edad y pueden servir de base para considerar estas procedencias en futuros experimentos de procedencias y fuentes de semilla en otros sitios del país.

⁶ UGALDE, L. 1996. Ensayos de procedencias. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Comunicación personal.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Mediante el método indirecto dasométrico, se obtuvieron los siguientes modelos predictivos del índice de sitio:

T. grandis, n = 664, r² = 0.49

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.8253 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.5162}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.5162}} \right)$$

B. quinatum, n = 306, r² = 0.73

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 5.1101 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.2361}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.2361}} \right)$$

G. arborea, n = 62, r² = 0.29

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (Hdom)} + 1.5830 \left(\frac{1}{\text{Edad}^{0.6533}} - \frac{1}{\text{Edad base}^{0.6533}} \right)$$

Los tres modelos, cumplieron todos los supuestos que tiene el método de los mínimos cuadrados.

2. La clasificación de los sitios y parcelas en base al índice de sitio, tuvo origen en la tabla que se muestra a continuación, permitiendo identificar cantones y sitios con los peores y mejores índices de sitio:

Clase de Sitio	Especies (edad base 10 años)					
	<i>T. grandis</i>		<i>B. quinatum</i>		<i>G. arborea</i>	
	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)	Ambito IS (m)	IMA Hdom (m/año)
Marginal	≤ 13.34	≤ 1.33	≤ 7.50	≤ 0.75	≤ 14.41	≤ 1.44
Bajo	13.35 - 18.31	1.34 - 1.83	7.51 - 10.94	0.76 - 1.09	14.42 - 20.65	1.45 - 2.06
Medio	18.32 - 20.80	1.84 - 2.08	10.95 - 13.43	1.10 - 1.34	20.66 - 21.92	2.07 - 2.19
Alto	20.81 - 23.49	2.09 - 2.34	13.44 - 16.26	1.35 - 1.62	21.93 - 25.25	2.19 - 2.52
Excelente	≥ 23.50	≥ 2.35	≥ 16.27	≥ 1.63	≥ 25.26	≥ 2.53

Para *T. grandis*, lotes de los sitios Moravia y Punta Coyote, con un índice de sitio promedio de 24.25 m, pertenecientes al cantón de Nandayure, fueron clasificadas como Excelentes. Los lotes clasificados como Marginales, para esta especie, corresponden a los cantones de Bagaces (sito Bagaces, con un índice de sitio promedio de 9.50 m), Nandayure (lotes de los sitios Moravia y Punta Coyote, con un índice de sitio promedio de 10.50 m) y Nicoya (lotes del sitio Garza, con un índice de sitio promedio de 13.05 m).

Para *B. quinatum*, lotes del sitio Garza, con un índice de sitio promedio de 17.47 m, perteneciente al cantón de Nicoya, presentaron el mayor porcentaje de sitios clasificados como Excelentes. Los cantones de Nicoya (lotes del sitio Garza, con un índice de sitio promedio de 7.21 m) y Santa Cruz (lotes del sitio Río Tabaco, con un índice de sitio promedio de 5.23 m) presentaron los mayores porcentajes de lotes clasificados como Marginales

Para *G. arborea*, lotes de los sitios Bajo Beneficio, Betania y Pilangosta, con un índice de sitio promedio de 29.30 m, pertenecientes al cantón de Hojancha, presentaron el mayor porcentaje de sitios clasificados como Excelentes. El cantón de Bagaces (sito La Virgen, con un índice de sitio promedio de 9.31 m) y Cañas (lotes del sitio Ganadería Montezuma, con un índice de sitio promedio de 12.76 m) presentaron los mayores porcentajes de lotes clasificados como Marginales.

Se observó que lotes dentro de un mismo sitios, fueron clasificados de manera opuesta (Marginal y Excelente), lo cual señala la alta variabilidad que se presenta en el trópico, con variaciones en el micrositio.

3. La clasificación de los sitios y parcelas en base al crecimiento y productividad, tuvo origen en la tabla que se muestra a continuación, permitiendo identificar cantones y sitios con los peores y mejores crecimientos y rendimientos:

<i>T. grandis</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.90	1.91 - 2.49	2.50 - 3.01	3.02 - 3.80	≥ 3.81
IMA-H	(m/año)	≤ 1.63	1.64 - 2.32	2.33 - 3.14	3.15 - 4.05	≥ 4.06
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 0.97	0.97 - 2.04	2.05 - 2.77	2.78 - 3.73	≥ 3.74
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 3.20	3.21 - 11.83	11.84 - 18.00	18.01 - 26.57	≥ 26.58
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 9.11	9.12 - 14.11	14.12 - 18.75	18.76 - 25.39	≥ 25.40

<i>B. quinatum</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.08	1.09 - 1.69	1.70 - 2.18	2.19 - 3.28	≥ 3.29
IMA-H	(m/año)	≤ 0.68	0.69 - 0.99	1.00 - 1.26	1.27 - 1.64	≥ 1.65
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 0.13	0.14 - 0.48	0.49 - 1.24	1.25 - 2.42	≥ 2.43
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 0.16	0.17 - 0.93	0.94 - 3.80	3.81 - 10.46	≥ 10.47
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 4.44	4.45 - 6.65	6.66 - 8.75	8.76 - 17.90	≥ 17.91

<i>G. arborea</i>						
Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA-Dap	(cm/año)	≤ 1.90	1.91 - 2.90	2.91 - 3.60	3.61 - 4.62	≥ 4.63
IMA-H	(m/año)	≤ 1.22	1.23 - 2.32	2.33 - 3.20	3.21 - 3.90	≥ 3.91
IMA-G	(m ² /ha/año)	≤ 1.53	1.54 - 2.20	2.21 - 3.39	3.40 - 4.63	≥ 4.64
IMA-V1	(m ³ /ha/año)	≤ 6.78	6.79 - 15.33	15.34 - 24.49	24.50 - 37.77	≥ 37.78
IMA-V2	(m ³ /ha/año)	≤ 5.23	5.24 - 9.00	9.01 - 13.04	13.05 - 20.96	≥ 20.97

Para *T. grandis*, el mayor porcentaje de lotes catalogadas como Excelentes, en todas las variables clasificatorias, correspondieron a los sitios Moravia y Punta Coyote, ubicados en el cantón de Nandayure. El sitio Bagaces, ubicado en el cantón del mismo nombre, siempre fue clasificado como Marginal.

Para *B. quinatum*, en la mayoría de las clasificaciones, el mayor porcentaje de lotes clasificadas como Excelentes, correspondieron a los sitios Garza y Zapote pertenecientes al cantón de Nicoya. Parcelas del sitio Río Tabaco, en la mayoría de los casos fueron clasificadas como Marginales.

Para *G. arborea*, en la mayoría de las clasificaciones, el sitio Betania ubicado en el cantón de Hojancha, presentó los mayores porcentajes de lotes clasificados como

Excelentes. El sitio La Virgen del cantón Bagaces fue clasificado como Marginal en todos los casos.

4 Para *T. grandis*, no hubo variables fisiográficas y foliares relacionadas significativamente ($P < 0.05$) con el índice de sitio. Dentro de las variables edáficas la relación del contenido de calcio (0 - 20 cm de profundidad) con el índice de sitio, fue positiva y altamente significativa ($P < 0.01$), en tanto la resistencia a la penetración lo hizo de manera negativa a igual nivel de significancia. La temperatura media anual y el déficit hídrico, dentro de las variables climáticas, se relacionaron de manera negativa y ambas fueron altamente significativas ($P < 0.01$). El coeficiente de determinación considerando la primera profundidad de suelo fue de 0.49, en tanto al considerar la primera y segunda profundidad en conjunto se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.68.

Por consiguiente, se recomienda establecer plantaciones de *T. grandis*, en sitios con contenidos de calcio de 0 - 20 cm de profundidad, superiores a 18 cmol(+)/L, con estructura laminar, ya que presenta menor resistencia a la penetración, con temperaturas medias anuales dentro del rango de variación 22 a 28°C, pero en lo posible más cercanas al límite inferior. Si algún nutriente, en especial calcio, presentara deficiencias en el suelo, sería aconsejable corregir esta situación mediante fertilización, la cual debe proporcionar el elemento deficitario, pero cuidando de no generar un desbalance entre los restantes nutrientes.

5. Para *B. quinatum*, las variables climáticas y foliares no presentaron una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$) con el índice de sitio, dentro de las variables fisiográficas, la pendiente presentó una relación estadísticamente significativa ($P < 0.05$) negativa con el índice de sitio. La única variable edáfica, que tuvo una relación con el índice de sitio, y esta fue altamente significativa ($P < 0.01$), fue el contenido de calcio de 0 - 20 cm de profundidad. El coeficiente de determinación obtenido fue de 0.34.

Por lo tanto, se recomienda establecer plantaciones de *B. quinatum*, en sitios con pendientes suaves y con contenidos de calcio de 0 - 20 cm de profundidad superiores a

18 cmol(+)/L. Si algún nutriente, en especial calcio, presentara deficiencias en el suelo, sería aconsejable corregir esta situación mediante fertilización, la cual debe proporcionar el elemento deficitario, pero cuidando de no generar un desbalance entre los restantes nutrientes.

6. Para *G. arborea*, dentro de las variables fisiográficas tanto la posición topográfica, positivamente, como el viento, negativamente, tuvieron una relación altamente significativa ($P < 0.01$), con el índice de sitio. Además dentro de las variables edáficas, el contenido de calcio de 0 - 20 cm de profundidad, positivamente, y el contenido de fósforo de 20 - 40 cm, negativamente, tuvieron una relación altamente significativa ($P < 0.01$) con el índice de sitio. Las variables climáticas y foliares, no presentaron relación con el índice de sitio. El coeficiente de determinación obtenido fue de 0.59.

Se recomienda considerar en la selección de sitios para establecer plantaciones, sitios con pendientes inferiores o fondos planos, protegidos del viento, con contenidos de calcio superiores a 18 cmol(+)/L. Si algún nutriente, en especial calcio, presentara deficiencias en el suelo, sería aconsejable corregir esta situación mediante fertilización, la cual debe proporcionar el elemento deficitario, pero cuidando de no generar un desbalance entre los restantes nutrientes.

7. El modelo de predicción del índice de sitio utilizando variables fisiográficas, edáficas, climáticas y foliares propuesto para *G. arborea*, conjuntamente con ser exacto fue insesgado, en tanto los modelos para *T. grandis* y *B. quinatum*, no lograron la exactitud de estimación requerida de 20% y además hubo que corregir el sesgo que presentaron. Los modelos propuestos, fueron los siguientes:

T. grandis, primera profundidad, $r^2 = 0.49$, 37% de exactitud

$$IS = \frac{25.432112 - 2.695521 \text{ DEFHID} + 0.268667 \text{ Ca}}{0.794}$$

T. grandis, primera y segunda profundidad, $r^2 = 0.68$, 27% de exactitud

$$IS = \frac{118.03081 - 3.989583 \text{ TMA} - 0.340751 \text{ RES} + 0.341109 \text{ Ca}}{0.851}$$

B. quinatum, primera profundidad, $r^2 = 0.34$, 27% de exactitud

$$IS = \frac{9.942913 - 1.531195 \text{ Log (PEND)} + 0.264734 \text{ Ca}}{0.897}$$

G. arborea, primera profundidad, $r^2 = 0.59$, 13% de exactitud.

$$IS = 15.509609 + 2.084607 \text{ PTOPE} - 2.334711 \text{ VIENTO} + 0.188707 \text{ Ca}$$

Por lo tanto se recomienda que los modelos propuestos para *T. grandis* y *B. quinatum*, sean considerados con la debida precaución que la situación amerita. También se recomienda que siempre se realice una validación externa de los modelos propuestos, ya sea utilizando la metodología descrita en esta investigación, o cualquier otra que permita conocer la exactitud lograda por los modelos.

8. Los modelos de predicción del índice de sitio, en base a variables fisiográfica, edáficas y climáticas de la totalidad de las investigaciones citadas, utilizan el método de los mínimos cuadrados; sin embargo, en ningún caso señalan si se realizó la comprobación de supuestos que dicho método posee.

Por lo tanto se recomienda en futuras investigaciones indicar explícitamente que se realizó la comprobación de dichos supuestos, para estar seguros de la veracidad de los modelos.

9. La fertilidad natural de los suelos, fue clasificada como adecuada en el 95% de los casos al considerar calcio y magnesio, alrededor del 50% de los casos al considerar potasio y tan solo en un 8% al observar el contenido de fósforo. En tanto la concentración foliar fue catalogada como intermedia a alta en un 95% de los casos para todos los nutrimentos antes descritos. Esto sugiere que probablemente los niveles

críticos definidos para cultivos agrícolas, no concuerden con los requerimientos de estas especies.

Además se recomienda montar ensayos de fertilización con fósforo (elemento que presenta las mayores deficiencias) en la zona de estudio.

10. Para *T. grandis*, el contenido de calcio en el suelo (0-20 cm de profundidad), se encuentra altamente correlacionado ($P < 0.01$) con el contenido de calcio foliar ($r^2 = 0.91$) y magnesio foliar ($r^2 = 0.92$). En ambos casos, la relación es positiva, lo cual confirma que esta especie es eminentemente basófila, ya que al aumentar en contenido de calcio en el suelo, aumenta el contenido foliar de calcio y magnesio.

Para *B. quinatum*, no se encontró una relación similar a la encontrada para *T. grandis*, para calcio y magnesio, sin embargo, el contenido de potasio en el suelo, se presentó altamente relacionado ($P < 0.01$) con el contenido de potasio foliar ($r^2 = 0.63$).

El contenido de limo del suelo, se relacionó de manera positiva y altamente significativa ($P < 0.01$) con el contenido de calcio foliar ($r^2 = 0.96$), magnesio foliar ($r^2 = 0.80$) para *T. grandis* y el contenido de fósforo foliar ($r^2 = 0.98$), para *B. quinatum*.

11. La procedencia Puntarenas y Quepos, Costa Rica, con un Incremento medio anual en diámetro de 2.76 y 2.48 (cm/año), un Incremento medio anual en altura de 1.96 y 1.79 (m/año) y un Incremento medio anual en volumen total de 12.42 y 11.41 (m^3 /ha/año) respectivamente, se presentan como las más prometedoras para desarrollar programas de reforestación en el área en el cantón de Nicoya.

8. LITERATURA CITADA

- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos II Predicción del rendimiento. FAO. FAO Montes 22/2. Roma. 80 p.
- ALFARO, M. 1983. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el valle central, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. UCR, CATIE. Costa Rica. 132 p.
- BAVER, L.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. 1973. Física de suelos. Unión Tipográfica Ed. Hispano Americana. 529 p.
- BERTSCH, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Segunda Ed. Universidad de Costa Rica, Vicerrectoría de Acción Social, Vicerrectoría de Investigación, Escuela de Fitotécnica. San José, Costa Rica. 78 p.
- _____. 1995. Fertilidad de suelos y su manejo. Asociación Costarricense de Suelos. San José, Costa Rica. 157 p.
- BOCKHEIM, J.; LEIDE, J.; FRELICH, L. 1989. Red pine growth and chemical composition of foliage and forest floors across a precipitation-chemistry gradient in Wisconsin. Can J. For. Res. 19: 1543 - 1549
- CAMPOS, J.J. 1989. Environmental effects on the productivity of *Eucalyptus camaldulensis*, *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium* Central America. Tesis Doc. Phill University of Oxfor. 156 p.
- CARTER, R.; KLINKA, K. 1990. Relationships between growing-season soil water-deficit, mineralizable soil nitrogen and site index of Coastal Douglas Fir. For. Eco Manage. 30: 301 - 311
- CATIE. 1991. Pochote: *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand, especie de árbol de uso múltiple en América Central. Proyecto Madeleña CATIE - ROCAP. Serie técnica, Informe técnico 172. 44 p.
- CHAVARRIA, M. 1996. Curvas preliminares de índices de sitio y factores de sitio asociado con el crecimiento del *Eucalyptus deglupta* Blume (deglupta) para la región Huetar Norte de Costa Rica. Tesis Licenciatura en Ciencias Forestales, Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales. Heredia, Costa Rica. 87 p.
- CHAVES, E.; FONSECA, W. 1991. Teca: *Tectona grandis* L. f., especie de árbol de uso múltiple en América Central. Proyecto Madeleña CATIE - ROCAP. Serie técnica, Informe técnico 179. 47 p.

- COURTIN, P. *et al.* 1988. An approach to quantitative classification of nutrient regimes of forest soils. *Can. J. Bot.* 66: 2640 - 2653
- DANIEL, P. *et al.* 1982. Principios de silvicultura. Segunda edición. Ed. Mc. Graw-Hill. México 492 p.
- DE LAS SALAS, G. 1984. Factores edáficos y climáticos en la clasificación de sitios forestales. *Bosques de Colombia*. Colombia. 1: 15-30
- DONOSO, C. 1981. Ecología Forestal: El bosque y su medio ambiente. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. Ed. Universitaria. 369 p.
- DRECHSEL, P.; ZECH, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant and Soil*. 131: 29 - 46
- _____. 1994. DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L. f.) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on teak growth in West Africa. *For. Ecol Manage* 70: 121 - 133
- DRIESSCHE, R. VAN DEN. 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review* 40(3): 347 - 394
- EVANS, J. 1979. The effects of leaf position and leaf age in foliar analysis of *Gmelina arborea* Roxb. *Plant and Soil* 52: 547 - 552
- FARR, W.; HARRIS, A. 1979. Site index of sitka spruce along the Pacific Coastal related to latitude and temperatures. *For. Sci.* 25 (1): 145 - 153
- FASSBENDER, H.; TSCHINKEL, H. 1974. Relación entre el crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitánica* y las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Turrialba. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 24 (2): 141 - 149.
- FASSBENDER, H.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina. Segunda edición. IICA. San José, Costa Rica. 420 p.
- FREESE, F. 1960. Testing Accuracy. *Forest Science*. 6 (2): 139 - 145
- GALLOWAY, G.; ALOMOTO, V.; MALDONADO, E. 1991. Estudio de algunas especies forestales en la región costera del Ecuador. Borrador presentado a la Subsecretaría Forestal y de Recursos Naturales Renovables. proyecto DESFIL / AID. 163 p.
- GAVANDE, S. 1972. Física de suelos: principios y aplicaciones. México. De. Limusa - Wiley. 351 p.

- GIRALDO, L.; DEL VALLE, J.; ESCOBAR, M. 1980. El crecimiento de nogal (*Cordia alliodora* Ruiz & Pavon) Oken en relación con algunos factores climáticos, edáficos y fisiográficos en el suroeste de Antioquia (Colombia). Revista Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Colombia. 23(1): 21 - 32
- GREEN, R.; MARSHALL, P.; KLINKA, K. 1989. Estimating site index of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb] Franco) from Ecological variables in Southwestern British Columbia. For. Sci. 35(1): 50 - 63
- GREGOIRE, T.; REYNOLDS, M. 1988. Accuracy testing and estimation alternatives. 1988. For. Sci. 34(2): 302 - 320
- GREY, D. 1989. A site-growth study of *Pinus radiata* in the Southern Cape. South African Forestry. 150: 32 - 39.
- GUJARATI, D. 1993. Econometría. Trad. por Víctor M. Mayorga T. Segunda edición México McGraw-Hill. 597 p.
- HAIRSTON, A.; GRIGAL, D. 1991. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. For. Ecol. Manage. 43: 35 - 45.
- HARTSHORN, G. *et al.* 1983. Costa Rica, perfil ambiental, estudio de campo. Centro Científico Tropical y AIDE San José, Costa Rica, 152 p.
- 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. UCR-CATIE. Turrialba, Costa Rica. 152 p.
- JOHNSON, J.; *et al.* 1987. Soil-site relationships and soil characteristics associated with even-aged red maple (*Acer rubrum*) stands in Wisconsin and Michigan. For. Ecol. Manage. 21: 75 - 89
- KABZEMS, R.; KLINKA, K. 1987. Initial quantitative characterization of soil nutrient regimens. II Relationships among soils, vegetation, and site index. Can. J. For. Res. 17: 1565 - 1571.
- KLINKA, K.; CARTER, R. 1990. Relationships between site index and synoptic environmental factors in immature coastal Douglas-Fir stands. For. Sci. 36(3): 815-830.
- LAMPRECHT, H. 1990. Silvicultura en los Trópicos. Traducido por Antonio Carrillo GTZ. Eschborn. 335 p.
- LOCKABY, B.; CUALFIELD, J. 1989. Geographic gradients in Loblolly pine site productivity and related environmental factors. South. J. Appl. For. 13(2):72-76.

- McLEOD, S.; RUNNING, S. 1988. Comparing site indices and productivity in ponderosa pine stands of western Montana. *Can. J. For. Res.* 18: 346-352
- MCNAB, W. 1989. Terrain shape index: Quantifying effect of minor landforms on tree height. *For. Sci.* 35(1): 91 - 104
- MOGREN, E.; DOLPH, K. 1972. Prediction of site index of Lodgepole pine from selected environmental factors. *For. Sci.* 18(4): 314 - 316
- MONSERUD, R.; MOODY, U.; BREUER, D. 1990. A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 20: 686 - 695
- MURILLO, O.; VALERIO, J. 1991. Melina: *Gmelina arborea* Roxb., especie de árbol de uso múltiple en América Central. Proyecto Madeleña CATIE-ROCAP. Serie técnica, Informe técnico 181. 69 p.
- 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.
- ORTEGA, H. 1986. Factores edáficos y topográficos que determinan la calidad de sitio en plantaciones jóvenes de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Pavones, Turrialba, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. UCR, CATIE. Costa Rica. 112 p.
- PACHECO, C. 1991. Evaluating site quality of even-aged maritime pine stands in northern Portugal using direct and indirect methods. *For. Ecol. Manage.* 41: 193 - 204
- PETERS, R. 1974. Prueba y corrección de las tablas de volumen para pino insigne (*Pinus radiata* D. Don). Instituto Forestal, Santiago Chile. Informe técnico n° 55. 41 p.
- RADWAN, M.; MURRAY, M.; KRAFT, J. 1989. Growth and foliar nutrient concentrations of Pacific silver fir. *Can. J. For. Res.* 19: 1429 - 1435
- REED, D.; JONES, E. 1989. Assessing multiple estimates of plantation productivity. *Can. J. For. Res.* 19: 948 - 954
- RAYNER, M. 1991. Site index and dominant height growth curves for regrowth karri (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell.) in south-western Australia. *For. Ecol. Manage.* 44: 261 - 283
- REYNOLDS, M. 1984. Estimating the error in model predictions. *For. Sci.* 30(2): 454 - 469
- SANCHEZ, A. 1994. Crecimiento de *Eucalyptus deglupta* y *Eucalyptus grandis* bajo tres sistemas de plantación a nivel de finca en la zona de Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. UCR, CATIE. Costa Rica. 95 p.

- SANCHEZ, P. 1981. Suelos del Trópico: características y manejo. San José, Costa Rica IICA, 660 p
- SCHLATTER, J. 1987. La fertilidad del suelo y el desarrollo de *pinus radiata* D. Don. Bosque, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 8(1): 13 - 19
- SCHMIDT, M.; CARMEAN, W. 1988. Jack pine site quality in relation to soil and topography in north central Ontario. Can. J. For. Res. 18: 297 - 305
- STUHRMANN, M.; BERGMANN, C.; ZECH, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* Roxb. plantations in the lowlands of northern Costa Rica. For. Ecol. Manage. 70: 135 - 145
- UGALDE, L. 1988. Sistema MIRA. CATIE, Costa Rica
- UGALDE, L. 1995. Establecimiento y medición de parcelas de crecimiento en investigación y programas de reforestación con la metodología del sistema MIRA. CATIE, Costa Rica. Material docente de la asignatura Silvicultura de plantaciones Forestales. 17 p.
- VALLEJOS, C. 1979. Un método para evaluar la exactitud de la función de volumen. Instituto Forestal, Santiago Chile. Informe técnico nº 75. 23 p.
- VASQUEZ, W. 1987. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus caribea* var. *hondurensis* en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. Tesis Magister Scientiae UCR, CATIE. Costa Rica. 113 p.
- _____. 1995. Calidad de sitio, crecimiento y rendimiento. Curso silvicultura de plantaciones. CATIE. 11 p.
- VASQUEZ, W.; UGALDE, L. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea* Roxb., *Tectona grandis* L. f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Pinus Caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Informe final, Convenio de Cooperación Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO) Proyecto Madeleña-3. Turrialba, Costa Rica. 132 p.
- _____. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Convenio de Cooperación IDA/FAO/Holanda y Proyecto Madeleña-3. Serie Técnica. Informe Técnico 256. 32 p.
- VERBYLA, D.; FISHER, R. 1989 b. Effect of aspect on ponderosa pine height and diameter growth. For. Ecol. Manage. 27: 93-98
- WILLIAMS, R.; HOFFMAN, B.; SEYMOUR, R. 1991. Comparison of site index and biomass production of spruce-fir stands by soil drainage class in Maine. For. Ecol. Manage. 41: 279 - 290

- 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 Bunca de Costa Rica. In II Congreso Forestal Nacional. La actividad forestal al servicio de un país en desarrollo. Resumen ponencias. 25 - 27 Noviembre. San José Costa Rica. 55 -57 p.
- ZEASER, D. 1995. Conceptos generales sobre la selección de sitios para plantar melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el sur de la provincia de Puntarenas. STON Forestal S.A. Depto. de Investigación y Desarrollo. Buenos Aires, Puntarenas, Costa Rica. 4 p. Mimeografiado
- 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. COSEFORMA, Documento del proyecto 39. San José, Costa Rica. 53 p.
- ZECH, W.; DRECHSEL, P. 1992. Multiple mineral deficiencies in forest plantations in Liberia. *For. Ecol. Manage.* 48 : 121 - 143

9. ANEXO

Cuadro 1a: Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para los modelos de índice de sitio generados, según especie

Análisis de varianza						
Especie	Fuente	Suma Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	P
<i>T. grandis</i>	Modelo	21.71	1	21.71	607.30	0.00
	Error	23.67	662	0.04		
<i>B. quinatum</i>	Modelo	59.54	1	59.54	842.27	0.00
	Error	21.49	304	0.07		
<i>G. arborea</i>	Modelo	3.07	1	3.07	26.10	0.00
	Error	7.05	60	0.12		

Análisis de correlación		
Especie	Error estándar de estimación	R cuadrado ajustado
<i>T. grandis</i>	1.2080	0.478
<i>B. quinatum</i>	1.3046	0.734
<i>G. arborea</i>	1.4090	0.292

Análisis de regresión					
Especie	Variable	Coefficiente	Error estándar	t	P
<i>T. grandis</i>	Constante	3.472315	0.037	93.57	0.00
	(1/(año ^{0.51616328}))	-1.825255	0.074	-24.64	0.00
<i>B. quinatum</i>	Constante	5.404274	0.128	42.35	0.00
	(1/año ^{0.23911579})	-5.110114	0.176	-29.02	0.00
<i>G. arborea</i>	Constante	3.335269	0.114	29.22	0.00
	(1/(año ^{0.6532681}))	-1.58298	0.310	-5.11	0.00

Comprobación supuestos método mínimos cuadrados

Especie		Supuestos de los residuos			
		Media	Varianza	Distribución	No hay
		igual cero: homocedástica		normal	autocorrelación:
		t	x ²	Kolmogorov	D Watson
<i>T. grandis</i>	Estadígrafo	-2.65E-13	16.11	0.07	1.93
	P	1.00	0.52	0.40	
<i>B. quinatum</i>	Estadígrafo	4.73E-14	18.50	0.06	1.90
	P	1.00	0.73	0.29	
<i>G. arborea</i>	Estadígrafo	-8.98E-15	17.59	0.21	1.93
	P	1.00	0.17	0.07	

Cuadro 2a: Número de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie

		Número de parcelas										
		B. quinatum					G. arborea					
Cantón	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares	2	2					1				1	
Bagaces	17	12	3	1			1		1			2
Cañas							7	2	3	1	1	1
Hojancha	128	8	61	32	26	1	30		11	16	3	4
La Cruz							4		1		3	1
Liberia	3	2		1			1		1			3
Nandayure	201	14	22	52	70	43	2		1	1	1	2
Nicoya	24	6	10	7	1		111	11	25	19	32	24
Osa	2	1	1									2
P. Zeledon	1			1								1
Puntarenas							1					
San Carlos	5				1	4						
Santa Cruz	8	4	1	2	1		24	10	3	6	5	9
Upala							3		1	2		3

		Promedio del IMA en diámetro (cm/año)										
		B. quinatum					G. arborea					
Cantón	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	
Abangares		1.48								2.19		
Bagaces		1.56	2.20	2.70				1.61			0.95	
Cañas							0.76	1.50	1.76	2.45	1.87	
Hojancha		1.73	2.27	2.72	3.17	4.46		1.53	1.88	2.39	1.65	
La Cruz								1.67		2.45		
Liberia		1.63		2.70				1.38			1.50	
Nandayure		1.66	2.30	2.80	3.31	3.99			1.77	2.48		
Nicoya		1.82	2.26	2.66	3.04				1.99	2.52	3.47	
Osa		1.62	2.09				0.97	1.42	1.99	2.52	3.47	
P. Zeledon				2.86								3.30
Puntarenas					3.52	4.05			2.11			3.80
San Carlos					3.05							3.80
Santa Cruz		1.83	2.24	2.63	3.05		0.70	1.45	1.88	2.77		3.70
Upala								1.32	1.92			3.80
												5.10

Continuación...

Cuadro 2a: Número de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie

Cantón	Número de parcelas																	
	T. grandis						B. quinatum						G. arborea					
	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares	2	2				1	1				1		5		1	2		1
Bagaces	16	14	2			1	1					2	2					
Cañas						7	2	3	2			5	2					
Hojancha	128	13	70	41	3	1	30	5	9	9	6	1	26	1	7	7	8	3
La Cruz						4	1				2	1	2					2
Liberia	3	2	1			1	1						3	1	2			
Nandayure	202	11	10	45	93	42	2				2		2				1	1
Nicoya	24	4	10	10		111	6	26	31	29	19	2	2				2	
Osa	2	1	1										2					
P. Zeledon	1					1												
Puntarenas						1					1							
San Carlos	5			1	2	2												
Santa Cruz	8	3	4	1		24	9	6	3	5	1	9	1	1	2	4	2	
Upala						3		1		1	1	1	3		1	1		1

Cantón	Promedio del IMA en altura (m/año)																	
	T. grandis						B. quinatum						G. arborea					
	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	
Abangares	1.39					1.48							1.80		2.70	3.40	3.90	
Bagaces	1.35	1.93					0.86					0.65						
Cañas							0.54	0.80	1.07			1.10	1.40				3.70	
Hojancha	1.55	2.05	2.68	3.47	4.10	1.36	0.66	0.90	1.11	1.36	1.93	1.10	2.09	2.61	3.36	4.11	4.20	
La Cruz						1.34	0.86			1.34	1.73							
Liberia	1.28	1.75					0.71					1.10	1.85					
Nandayure	1.39	2.12	2.81	3.52	4.37	1.38				1.38	1.78				3.60	4.40		
Nicoya	1.54	2.07	2.66			1.44	0.61	0.87	1.13	1.44	1.78				3.55			
Osa	1.45	1.94																
P. Zeledon					4.05													
Puntarenas					4.21													
San Carlos			3.13	3.90		1.54												
Santa Cruz	1.49	2.00	2.70			1.40	0.46	0.84	1.06	1.40	1.63	1.23	1.87	2.76	3.25			
Upala						1.40	0.74			1.40	1.73		2.10	2.90			3.70	

Continuación ...

Cuadro 2a: Número de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie

Cantón	Número de parcelas																	
	<i>T. grandis</i>						<i>B. quinalatum</i>						<i>G. arborea</i>					
	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares	2		1	1		1						1	5		2	2		1
Bagaces	16	9	5	2		1				1			2	2				
Cañas						7	1	1	1	3		1	5		2	2		1
Hojancha	128	3	39	57	29	30			8	19	3	26		4	11	7	2	2
La Cruz						4			1	2	1	2					1	1
Liberia	3		2		1	1			1			3			1	1	1	1
Nandayure	202	20	38	36	60	47						2	2				1	1
Nicoya	24	14	9		1	111	17	39	28	19	8	2	2				1	1
Osa	2		1		1								2				1	1
P. Zeledon	1		1															
Puntarenas						1					1							
San Carlos	5			1	4													
Santa Cruz	8	4	2		2	24	6	5	7		6	9	2	1	1	1	5	
Upala						3				1	2	3					1	1

Cantón	Promedio del IMA en área basal (m ² /ha/año)																	
	<i>T. grandis</i>						<i>B. quinalatum</i>						<i>G. arborea</i>					
	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente		Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	
Abangares		1.50	2.12									3.00			2.49	3.96		8.06
Bagaces	0.73	1.54	2.30							1.83			0.66					5.50
Cañas							0.09	0.45	1.06	1.54	2.21			1.98	3.09			4.99
Hojancha	0.96	1.71	2.39	2.98					1.03	1.53	2.75		1.45	2.01	2.59	3.81	4.23	6.41
La Cruz									1.12	1.76	2.91							
Liberia									1.01					1.79	2.80			3.55
Nandayure	0.72	1.63	2.47	3.18	3.96				0.78	1.53	3.24							4.63
Nicoya	0.79	1.45	2.84	2.87			0.10	0.33										4.84
Osa		1.53																
P. Zeledon		1.22																
Puntarenas																		
San Carlos			2.72	3.15														
Santa Cruz	0.96	1.87		2.91			0.07	0.28	0.81		2.62		1.14	1.97	3.28	3.67		
Upala										1.41	3.23				3.22	4.49		7.89

Continuación ...

Cuadro 2a: Número de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie

Cantón	Número de parcelas														
	<i>T. grandis</i>					<i>B. quinatum</i>					<i>G. arborea</i>				
	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Bagaces	2		2		1					1			2	2	1
Cañas	10	4	2		1			1			2				
Hojancha						1	1	3	1	1	1	2		1	1
La Cruz	129	34	54	38	1	30	3	3	20	7	26	9	9	5	2
Liberia					4			1	2	1	2			1	1
Nandayure	3	3			1			1			3	2	1		
Nicoya	202	47	32	58	45	2			1	1	2			1	1
Osa	24	5	2	1		111	16	41	30	6	2			1	1
P. Zeledon	2	1		1											
Puntarenas	1														
San Carlos															
Santa Cruz	6	1	3	1		1				1					
Upala	8	4	1	3		24	7	5	6	3	9	1	2	3	1

Cantón	Promedio del IMA en volumen total (m ³ /ha/año)														
	<i>T. grandis</i>					<i>B. quinatum</i>					<i>G. arborea</i>				
	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares			14.86							27.02		20.22	31.28	37.47	
Bagaces	1.70	7.22	15.73						8.93		2.97				
Cañas						0.08	0.60	2.84	4.68	10.78	7.04	10.37	29.85	44.34	
Hojancha	2.31	9.81	14.74	20.46	26.62			2.80	6.82	13.69	5.71	12.61	26.34	41.94	
La Cruz								1.90	4.79	10.18			33.72	55.06	
Liberia		8.23						1.58				13.62	19.91		
Nandayure	1.92	7.96	15.26	21.74	28.20			1.99	5.47	14.43			27.02	44.18	
Nicoya	2.67	7.17	15.09	22.96				0.11	0.57	12.59			35.55	37.65	
Osa		8.19		20.46											
P. Zeledon		4.55													
Puntarenas										18.79					
San Carlos		11.43	14.63	17.80											
Santa Cruz	2.86	5.77	14.67			0.08	0.51	1.69	8.26	12.91	3.55	11.80	21.06	32.42	40.25
Upala								3.25		22.82	6.36		20.45		

Continuación ...

Cuadro 2a: Número de parcelas y promedio, según variable, cantón, clase de sitio y especie

Cantón	Número de parcelas																			
	T. grandis						G. arborea													
	B. quinaltum			G. arborea			B. quinaltum			G. arborea										
Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Parcelas	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente			
Abangares	1	1				1					1	5			1		4			
Bagaces	4	2	2			1			1			2	2							
Cañas						1				1		5	1	2		1	1			
Hojancha	117	20	45	44	8	23	4	8	5	5	1	26	3	8	11	2	2			
La Cruz												2					1			
Liberia	1	1										3		2	1		1			
Nandayure	71			4	41	26						2				1	1			
Nicoya	5	2	2		1	2			1	1		2					2			
Osa	1			1								2								
P. Zeledon																				
Puntarenas						1				1										
San Carlos																				
Santa Cruz	2		1	1								9	2	1	1	4	1			
Upala						2					2	2		1		1				
Promedio del IMA en volumen comercial (m ³ /ha/año)																				
T. grandis																				
B. quinaltum																				
G. arborea																				
Cantón	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente
Abangares	9.85									18.27								10.85	17.12	
Bagaces	6.82	11.54						8.10			1.98									
Cañas									8.76		4.87									
Hojancha	8.13	12.37	15.95	19.55			4.14	6.21	7.48	11.68	5.39	7.72	10.87	15.87	22.47			14.75	25.16	
La Cruz																				
Liberia	6.47																			
Nandayure																				
Nicoya	8.26	11.16	17.40	22.19	26.82			8.74	10.71											
Osa			17.14	19.05																
P. Zeledon																				
Puntarenas									14.60											
San Carlos																				
Santa Cruz		12.67	16.90								2.65	7.50	12.79	16.53	21.52					
Upala										21.17		7.55		16.30						

Cuadro 4a: Matriz de correlación entre variables consideradas para *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand

	IS	ELEV	PMA	TMA	DEFHID	PTOP	DREN	PEDRE	ERO	PEND	ASPE	VIENTO	RES	PH	PH2	ACDEXT	ACDEXT2	ARENA	ARENA2	LIMO	ARCILLA	ARCILLAZ	MO	MO2	CAMGK1	CAMGK2	CA	CA2	MG	MG2	K	K2	P	P2	HCA	HMG	HK	HP							
ELEV	-0.24	1.00																																											
PMA	0.17	0.03	1.00																																										
TMA	-0.06	0.20	-0.03	1.00																																									
DEFHID	-0.11	0.01	-0.41	0.55	1.00																																								
PTOP	0.23	-0.21	-0.16	-0.17	-0.19	1.00																																							
DREN	-0.26	-0.12	-0.34	-0.05	0.05	-0.19	1.00																																						
PEDRE	-0.21	0.02	0.43	0.06	0.05	-0.36	-0.12	1.00																																					
ERO	-0.06	-0.17	-0.46	0.18	0.26	-0.20	0.32	-0.26	1.00																																				
PEND	-0.36	0.06	0.03	0.04	0.15	-0.55	0.35	0.32	0.06	1.00																																			
ASPE	0.17	-0.11	-0.10	-0.22	0.00	0.03	-0.33	0.03	-0.01	-0.23	1.00																																		
VIENTO	-0.31	0.33	-0.39	0.02	0.03	0.06	-0.17	-0.15	0.08	-0.14	-0.01	1.00																																	
RES	-0.22	0.24	0.37	0.19	0.08	-0.18	-0.01	-0.16	-0.20	0.09	-0.25	1.00																																	
PH	-0.03	-0.12	-0.15	0.57	0.56	-0.11	0.11	0.16	0.22	0.08	0.04	0.11	-0.18	1.00																															
PH2	0.40	-0.17	0.02	0.13	0.16	0.03	0.04	-0.01	0.14	0.28	0.16	-0.48	0.79	1.00																															
ACDEXT	-0.06	0.16	0.32	0.35	-0.29	-0.31	0.34	-0.23	0.05	0.24	0.10	0.34	-0.30	-0.39	1.00																														
ACDEXT2	-0.08	0.28	0.39	0.42	0.04	-0.43	0.29	-0.47	0.14	0.06	0.08	0.04	-0.20	-0.16	0.61	1.00																													
ARENA	-0.04	0.04	-0.10	0.19	0.11	0.21	-0.40	-0.10	-0.18	0.12	0.50	0.41	0.23	-0.03	0.05	0.13	1.00																												
ARENA2	-0.07	0.34	0.62	0.48	-0.05	-0.62	0.14	-0.78	0.21	0.12	-0.18	0.28	-0.11	-0.09	0.28	0.46	0.78	1.00																											
LIMO	0.17	-0.24	0.03	-0.10	-0.12	0.21	-0.35	-0.07	-0.05	-0.20	0.11	0.08	0.05	-0.13	-0.08	0.30	0.48	-0.25	0.34	1.00																									
LIMO2	0.19	0.00	0.53	0.56	0.06	-0.66	0.28	-0.46	-0.27	0.39	0.09	-0.04	0.22	0.18	0.38	0.43	0.37	0.48	0.72	1.00																									
ARCILLA	-0.08	0.13	0.07	-0.10	-0.01	-0.34	0.67	0.15	0.12	0.31	-0.19	-0.50	-0.40	-0.10	0.09	-0.19	-0.33	-0.73	-0.80	-0.48	-0.61	1.00																							
ARCILLAZ	-0.01	-0.27	-0.68	-0.58	0.01	0.73	-0.20	0.77	-0.05	-0.24	0.11	-0.24	0.02	0.04	-0.37	-0.52	-0.75	-0.95	-0.52	-0.72	0.65	1.00																							
MO	-0.04	0.25	-0.30	0.16	0.18	0.13	-0.14	-0.35	0.22	-0.13	-0.06	0.31	-0.05	-0.04	-0.05	-0.49	-0.25	0.12	-0.12	0.26	-0.25	-0.30	0.16	1.00																					
MO2	-0.05	-0.13	0.13	0.38	-0.01	-0.28	-0.10	0.12	-0.50	0.14	0.38	0.19	0.08	-0.07	-0.13	-0.30	0.33	0.01	0.12	0.40	-0.33	-0.15	0.24	1.00																					
CAMGK1	0.35	-0.20	0.11	-0.08	0.03	-0.12	0.07	0.18	-0.05	0.22	0.01	-0.45	-0.67	-0.02	0.46	-0.20	0.13	-0.35	0.01	0.20	0.23	0.18	-0.07	0.04	-0.25	1.00																			
CAMGK2	0.30	0.11	-0.17	-0.08	0.06	-0.08	0.09	-0.21	0.19	0.14	0.12	-0.73	0.29	0.42	-0.13	0.26	0.01	0.16	0.34	0.19	-0.05	-0.18	0.07	-0.35	0.91	1.00																			
CA	0.39	-0.16	0.20	-0.07	0.04	-0.11	0.01	0.21	-0.08	0.19	0.03	-0.45	-0.48	0.45	0.52	-0.15	0.14	0.16	0.27	0.36	0.38	-0.27	-0.33	-0.03	-0.30	0.82	0.95	1.00																	
CA2	0.47	0.24	0.18	0.11	0.14	-0.34	0.29	-0.41	0.02	0.34	-0.09	-0.46	0.45	0.52	-0.15	0.14	0.16	0.27	0.36	0.38	-0.27	-0.33	-0.03	-0.30	0.82	0.95	1.00																		
MG	0.10	-0.25	-0.14	-0.07	-0.02	-0.14	0.25	0.02	0.04	0.26	-0.06	-0.30	-0.51	-0.14	-0.16	0.04	0.19	-0.33	-0.14	0.24	-0.18	0.13	0.18	0.10	-0.11	0.72	0.45	0.53	-0.07	1.00															
MG2	-0.22	-0.18	-0.60	-0.33	-0.13	0.41	-0.28	0.29	0.32	-0.27	0.36	0.55	-0.19	-0.06	0.01	0.22	-0.23	-0.14	-0.33	-0.27	0.34	0.21	0.16	-0.14	0.32	0.48	-0.10	-0.11	0.50	1.00															
K	0.18	0.16	-0.14	-0.05	0.15	0.33	-0.33	-0.13	0.01	-0.31	0.06	0.34	0.06	0.03	0.00	-0.03	0.13	0.54	0.11	-0.24	0.18	-0.33	-0.16	0.11	0.04	-0.27	-0.11	-0.24	0.06	-0.38	-0.33	1.00													
K2	0.30	0.00	0.48	0.39	0.22	-0.38	-0.05	-0.36	-0.30	-0.11	-0.10	0.09	-0.28	-0.14	-0.03	0.05	0.14	0.12	0.07	0.06	-0.15	-0.12	-0.04	0.04	-0.27	-0.26	-0.20	-0.16	-0.29	-0.26	0.89	1.00													
P	0.34	0.07	0.33	0.31	0.56	-0.30	-0.16	-0.23	-0.35	-0.10	0.01	-0.12	0.23	0.32	-0.27	-0.09	-0.01	-0.16	0.26	0.19	-0.11	0.06	0.20	0.32	0.02	-0.08	0.16	0.04	-0.32	-0.22	0.63	0.39	1.00												
P2	0.37	0.02	0.39	0.40	0.45	-0.36	-0.11	-0.27	-0.31	-0.02	0.04	-0.12	0.22	0.35	-0.16	-0.02	0.00	-0.10	0.31	0.32	-0.13	-0.03	0.07	0.34	-0.02	-0.10	0.14	0.06	-0.39	-0.28	0.57	0.98	1.00												
HCA	0.15	-0.42	0.62	-0.59	0.62	-0.46	-0.20	0.00	-0.01	0.05	-0.52	-0.32	0.12	-0.23	-0.17	-0.38	-0.08	0.34	0.43	0.15	-0.20	-0.28	-0.19	-0.30	-0.08	0.07	0.59	0.54	0.60	0.52	1.00														
HMG	-0.54	-0.42	0.34	-0.10	0.25	-0.05	0.09	0.08	0.02	-0.19	0.12	0.11	0.01	0.25	-0.35	-0.25	0.13	0.37	-0.21	-0.08	-0.20	-0.22	-0.30	0.36	0.32	0.19	0.10	0.10	0.59	1.00															
HK	0.55	-0.33	0.60	-0.19	-0.50	-0.03	-0.57	0.03	0.27	0.08	0.25	-0.61	-0.51	0.49	0.32	0.47	0.31	-0.01	-0.34	0.39	0.47	0.40	0.38	-0.20	0.00	0.74	0.41	0.52	0.55	0.40	0.03	1.00													
HP	0.49	0.01	0.35	0.09	-0.22																																								

Cuadro 6a: Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para la relación entre índice de sitio y variables fisiográficas, climáticas y edáficas, según especie y profundidad del suelo (1ª = 0 - 20 cm, 2ª = 20 - 40 cm).

Análisis de varianza							
Especie	Profundidad del suelo	Fuente	Suma Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	P
<i>T. grandis</i>	1ª	Modelo	704 720	2	352.360	29.87	0.00
		Error	695.925	59	11.795		
	1ª + 2ª	Modelo	806.426	3	268.809	31.62	0.00
		Error	348.499	41	8.499		
<i>B. quinatum</i>	1ª	Modelo	223.118	2	111.559	11.49	0.00
		Error	378.528	39	9.705		
<i>G. arborea.</i>	1ª	Modelo	393.885	3	131.295	15.58	0.00
		Error	236.008	28	8.429		

Análisis de correlación			
Especie	Profundidad del suelo	Error estándar de estimación	R cuadrado ajustado
<i>T. grandis</i>	1ª	3.434435	0.4863
	1ª + 2ª	2.915471	0.6762
<i>B. quinatum</i>	1ª	3.115422	0.3386
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	1ª	2.903248	0.5852

Análisis de regresión						
Especie	Profundidad del suelo	Variable	Coefficiente	Error estándar	t	P
<i>T. grandis</i>	1ª	Constante	26.901112	3.456	7.78	0.00
		DEFHID	-2.695521	0.538	-5.00	0.00
		Ca	0.268667	0.060	4.41	0.00
	1ª + 2ª	Constante	119.007808	27.365	4.35	0.00
		TMA	-3.989583	1.037	-3.85	0.00
		RES	-0.340751	0.141	-2.40	0.02
<i>B. quinatum</i>	1ª	Constante	11.044913	1.456	7.58	0.00
		log(PEND)	-1.531195	0.413	-3.70	0.00
		Ca	0.264734	0.067	3.93	0.00
<i>G. arborea.</i>	1ª	Constante	15.509609	2.541	6.10	0.00
		PTOP	2.084607	0.579	3.60	0.00
		VIENTO	-2.334711	0.746	-3.13	0.00
		Ca	0.188707	0.058	3.24	0.00

Donde:

DEFHID = Déficit hídrico

RES = Resistencia a la penetración

PTOP = Posición topográfica

TMA = Temperatura media anual

Ca = Contenido de calcio

VIENTO = Viento

Continuación.....

Cuadro 6a: Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para la relación entre índice de sitio y variables fisiográficas, climáticas y edáficas, según especie y profundidad del suelo (1ª = 0 - 20 cm, 2ª = 20 - 40 cm)

Comprobación supuestos método mínimos cuadrados

Especie	Profundidad del suelo		Supuestos de los residuos			
			Media igual cero	Varianza homocedástica	Distribución normal kolmogorov	No hay autocorrelación D.Watson
<i>T. grandis</i>	1ª	Estadígrafo	-1.01E-9	0.710	0.056	1.833
		P	1.00	0.87	0.99	
	1ª + 2ª	Estadígrafo	-1.01E-9	2.351	0.086	2.165
		P	1.00	0.50	0.89	
<i>B. quinatum</i>	1ª	Estadígrafo	-2.34E-10	0.601	0.071	1.683
		P	1.00	0.90	0.98	
<i>G. arborea</i>	1ª	Estadígrafo	6.73E-10	3.917	0.143	1.888
		P	1.00	0.27	0.526	

Cuadro 7a: Detalle de la prueba de validación (clasificación del sesgo y evaluación de la exactitud) propuesta por Freese (1960) y modificada por Vallejos (1979), según especie y profundidad del suelo (1ª = 0 - 20 cm, 2ª = 20 - 40 cm)

Clasificación del sesgo

Especie	Profundidad del suelo	Variable	Coficiente	Error estándar	t	P
<i>T. grandis</i>	1ª	Constante	1.4694715	0.284	5.166	0.00
		IS observado	0.794263	0.152	-5.259	0.00
	1ª + 2ª	Constante	0.977395	0.2094	4.667	0.00
		IS observado	0.850795	0.112	-7.596	0.00
<i>B. quinatum</i>	1ª	Constante	1.114071	0.171	6.515	0.00
		IS observado	0.896871	0.148	-6.060	0.00
<i>G. arborea</i>	1ª	Constante	-1.481016	4.619	-0.321	0.76
		IS observado	1.087939	0.226	0.388	0.85

Continuación....

Cuadro 7a: Detalle de la prueba de validación (clasificación del sesgo y evaluación de la exactitud) propuesta por Freese (1960) y modificada por Vallejos (1979), según especie y profundidad del suelo (1ª = 0 - 20 cm, 2ª = 20 - 40 cm)

Evaluación de la exactitud

Especie	Profundidad del suelo	Valor Chi-cuadrado tabulado	Valor Chi-cuadrado calculado
<i>T. grandis</i>	1ª	23.68	79.73
	1ª + 2ª	23.68	40.65
<i>B. quinatum</i>	1ª	15.51	28.75
<i>G. arborea</i>	1ª	15.51	6.21

Cuadro 8a: Análisis de varianza de las variables químicas foliares, según tipo de análisis

Tipo de análisis	Especie y (Sitio)	Nutriente	Fuente variación	Suma Cuadrados	G.I	Cuadrado medio	F	P
Diferencias entre lotes de un mismo sitio	<i>T. grandis</i> (Bagaces)	Ca	Entre grupos	0.04	2	0.0221	0.49	0.71
			Dentro grupos	0.05	1	0.0450		
		Mg	Entre grupos	0.00	2	0.0011	0.11	0.90
			Dentro grupos	0.01	1	0.0098		
		K	Entre grupos	0.26	2	0.1286	0.50	0.71
			Dentro grupos	0.26	1	0.2592		
	P	Entre grupos	0.00	2	0.0022	0.43	0.73	
		Dentro grupos	0.01	1	0.0050			
	<i>T. grandis</i> (Río Tabaco)	Ca	Entre grupos	0.07	2	0.0326	2.00	0.33
			Dentro grupos	0.03	2	0.0163		
		Mg	Entre grupos	0.00	2	0.0017	3.85	0.21
			Dentro grupos	0.00	2	0.0004		
K		Entre grupos	0.76	2	0.3824	31.52	0.03	
		Dentro grupos	0.02	2	0.0121			
P	Entre grupos	0.00	2	0.0013	0.42	0.71		
	Dentro grupos	0.01	2	0.0030				
<i>B. quinatum</i> (Garza)	Ca	Entre grupos	0.17	7	0.0239	2.71	0.30	
		Dentro grupos	0.02	2	0.0088			
	Mg	Entre grupos	0.01	7	0.0015	1.48	0.46	
		Dentro grupos	0.00	2	0.0010			
	K	Entre grupos	0.11	7	0.0153	2.50	0.32	
		Dentro grupos	0.01	2	0.0061			
	P	Entre grupos	0.01	7	0.0017	2.64	0.30	
		Dentro grupos	0.00	2	0.0006			

Continuación...

Cuadro 8a: Análisis de varianza de las variables químicas foliares, según tipo de análisis

Tipo de análisis	Especie y (Sitio)	Nutriente	Fuente variación	Suma Cuadrados	G.I.	Cuadrado medio	F	P
Diferencias entre los sitios	<i>T. grandis</i>	Ca	Entre grupos	0.84	2	0.42	15.29	0.00
			Dentro grupos	0.27	10	0.03		
		Mg	Entre grupos	0.05	2	0.02	10.49	0.00
			Dentro grupos	0.02	10	0.00		
		K	Entre grupos	0.13	2	0.07	0.48	0.63
			Dentro grupos	1.39	10	0.14		
		P	Entre grupos	0.02	2	0.01	3.19	0.08
			Dentro grupos	0.03	10	0.00		
	<i>B. quinatum</i>	Ca	Entre grupos	0.04	1	0.04	2.23	0.16
			Dentro grupos	0.21	13	0.02		
		Mg	Entre grupos	0.02	1	0.02	15.57	0.00
			Dentro grupos	0.01	13	0.00		
		K	Entre grupos	0.00	1	0.00	0.11	0.75
			Dentro grupos	0.29	13	0.02		
		P	Entre grupos	0.00	1	0.00	1.00	0.35
			Dentro grupos	0.02	13	0.00		
Diferencias por edad	<i>T. grandis</i>	Ca	Entre grupos	0.92	3	0.31	13.88	0.00
			Dentro grupos	0.20	9	0.02		
		Mg	Entre grupos	0.05	3	0.02	6.56	0.01
			Dentro grupos	0.02	9	0.00		
		K	Entre grupos	0.14	3	0.05	0.31	0.82
			Dentro grupos	1.38	9	0.15		
		P	Entre grupos	0.02	3	0.01	2.15	0.16
			Dentro grupos	0.02	9	0.00		
	<i>B. quinatum</i>	Ca	Entre grupos	0.07	4	0.02	0.94	0.48
			Dentro grupos	0.18	10	0.02		
		Mg	Entre grupos	0.03	4	0.01	13.56	0.00
			Dentro grupos	0.00	10	0.00		
		K	Entre grupos	0.05	4	0.01	0.53	0.72
			Dentro grupos	0.24	10	0.02		
		P	Entre grupos	0.00	4	0.00	0.53	0.72
			Dentro grupos	0.02	10	0.00		

Cuadro 9a Análisis de varianza, análisis de correlación, análisis de regresión y comprobación de los supuestos del método de los mínimos cuadrados para los modelos de índice de sitio generados, según especie

Análisis de varianza									
Especie	Modelo n°	Variable dependiente	Variable independiente	Fuente	Suma Cuadrado	GL	Cuadrado medio	F	P
<i>T. grandis.</i>	1	Ca _r	Limo _s	Modelo	10.97	1	10.97	328.47	0.00
				Error	0.40	12	0.03		
	2	Mg _r	Limo _s y Limo _s ²	Modelo	0.06	2	0.03	24.49	0.00
				Error	0.01	10	0.001		
	3	Ca _r	Ca _s	Modelo	10.39	1	10.39	126.08	0.00
				Error	0.99	12	0.08		
4	Mg _r	Ca _s	Modelo	0.82	1	0.82	201.44	0.00	
			Error	0.05	12	0.004			
5	Ca _r	Mg _r	Modelo	10.99	1	10.99	338.31	0.00	
			Error	0.39	12	0.03			
6	P _r	P _s	Modelo	0.46	1	0.46	25.97	0.00	
			Error	0.21	12	0.02			
<i>B. quinatum</i>	7	K _r	K _s y K _s ²	Modelo	0.19	2	0.09	10.30	0.00
				Error	0.11	12	0.009		
	8	P _r	Limo _s	Modelo	1.01	1	1.01	754.70	0.00
				Error	0.02	14	0.001		

Análisis de correlación			
Especie	Modelo n°	Error estándar de estimación	R cuadrado ajustado
<i>T. grandis</i>	1	0.1828	0.9648
	2	0.0340	0.7965
	3	0.2870	0.9131
	4	0.0639	0.9190
	5	0.1802	0.9657
	6	0.1329	0.6840
<i>B. quinatum</i>	7	0.0952	0.6318
	8	0.0367	0.9818

Análisis de regresión

Especie	Modelo nº	Variable	Coefficiente	Error estándar	t	P
<i>T. grandis</i>	1	Constante	-	-	-	-
		Limo _s	0.028899	0.001595	18.12	0.00
	2	Constante	-1.170198	0.355199	-3.29	0.01
		Limo _s	0.084556	0.024042	3.52	0.01
		Limo _s ²	-0.001217	0.000396	-3.0732	0.01
	3	Constante	-	-	-	-
Ca _s		0.043077	0.003836	11.23	0.00	
4	Constante	-	-	-	-	
	Ca _s	0.012114	0.000854	14.19	0.00	
5	Constante	-	-	-	-	
	Mg _r	3.552798	0.193158	18.39	0.00	
6	Constante	-	-	-	-	
	P _s	0.047168	0.009255	5.10	0.00	
<i>B. quinatum</i>	7	Constante	0.898761	0.056673	15.86	0.00
		K _s	1.171358	0.329147	3.56	0.00
		K _s ²	-0.950785	0.352158	-2.70	0.02
	8	Constante	-	-	-	-
		Limo _s	0.007848	0.000286	27.47	0.00

Comprobación supuestos método mínimos cuadrados

Especie	Modelo nº		Supuestos de los residuos			
			Media igual	Varianza	Distribución	No hay
			cero:	homocedástica	normal	autocorrelación:
			t	x2	kolmogorov	D.Watson
<i>T. grandis</i>	1	Estadígrafo	-0.33	0.72	0.14	2.53
		P	0.74	0.69	0.95	
	2	Estadígrafo	-6.66E-14	0.04	0.17	2.28
		P	1.00	0.98	0.84	
	3	Estadígrafo	0.38	1.26	0.12	1.34
		P	0.70	0.53	0.99	
4	Estadígrafo	0.42	0.11	0.14	1.37	
	P	0.68	0.95	0.95		
5	Estadígrafo	0.12	3.40	0.17	1.55	
	P	0.91	0.18	0.86		
6	Estadígrafo	1.11	0.87	0.16	1.34	
	P	0.22	0.65	0.88		
<i>B. quinatum</i>	7	Estadígrafo	1.72E-14	0.03	0.18	2.23
		P	1.00	0.86	0.74	
	8	Estadígrafo	0.11	0.01	0.13	2.13
		P	0.91	0.91	0.96	

Cuadro 10a: Análisis de varianza del ensayo de procedencia, según variable estudiada

Variable	Fuente de variación	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrados Medios	F	P
Incremento en Dap	Parcela	1.82	5	0.36	2.14	0.07
	Bloque	0.56	2	0.28	1.64	0.19
	Residuo	14.59	86	0.17		
Incremento en Altura	Parcela	0.65	5	0.13	3.69	0.00
	Bloque	0.04	2	0.02	0.57	0.57
	Residuo	3.03	86	0.04		
Incremento en volumen total	Parcela	96.10	5	19.22	0.91	0.48
	Bloque	51.11	2	25.55	1.21	0.30
	Residuo	1823.71	86	21.21		