

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

// Evaluación de la calidad de sitio para
Pinus oocarpa Schiede, en la zona de
amortiguamiento de la Reserva de la
Biosfera Sierra de Las Minas,
Guatemala.

Por

✓
Adelso de Jesús Revolorio Quevedo


Turrialba, Costa Rica

1996

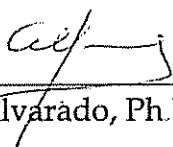
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:



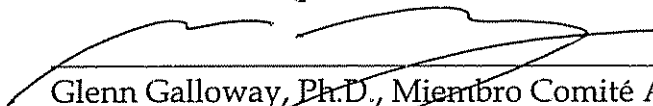
José Joaquín Campos, Ph.D. , Profesor Consejero



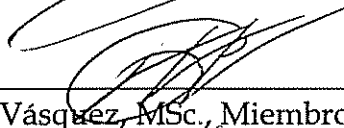
Alfredo Alvarado, Ph.D., Miembro Comité Asesor



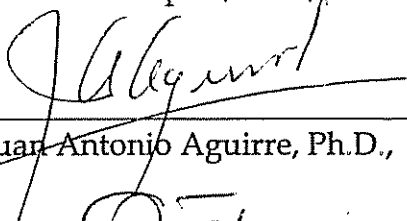
Bryan Finegan, Ph.D., Miembro Comité Asesor



Glenn Galloway, Ph.D., Miembro Comité Asesor



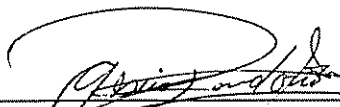
William Vásquez, MSc., Miembro Comité Asesor



Juan Antonio Aguirre, Ph.D., Jefe, Area de Postgrado



Pedro Ferreira, Ph.D., Director, Programa de Enseñanza



Adolfo Revolorio Quevedo , Candidato

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Joaquín Campos, consejero principal, por su acertada orientación en el desarrollo de este estudio y por el apoyo brindado principalmente en los momentos difíciles.

Al Dr. Glenn Galloway, por su amistad, su incondicional apoyo y por sus múltiples consejos y críticas constructivas durante el desarrollo del trabajo.

Al Dr. Bryan Finegan, por las acertadas sugerencias durante la parte final de este trabajo.

Al Dr. Alfredo Alvarado, por las relevantes sugerencias para mejorar este estudio.

Al M.Sc. William Vásquez, por sus sugerencias y atinados consejos durante la ejecución de la presente investigación.

Al M.Sc. Bernal Herrera, por su amistad y el apoyo brindado para el procesamiento e interpretación de los datos.

A Jonhny Pérez por su apoyo en los análisis estadísticos.

A la Agencia Finlandesa para el Desarrollo "FINNIDA" por financiar la mayor parte de mis estudios en este centro de investigación.

A la Cooperación Suiza para el Desarrollo "COSUDE" por complementar el financiamiento de mis estudios.

Al proyecto 7 de PROCAFOR-FINNIDA, especialmente al personal de la Dirección de dicho proyecto, por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría, principalmente durante el trabajo de campo.

A la Fundación Defensores de la Naturaleza especialmente a su Director ejecutivo M.Sc. Oscar Nuñez y al personal del Distrito Motagua por el apoyo recibido para la ejecución de la etapa de campo.

A la Dirección General de Bosques y Vida Silvestre del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, por el tiempo concedido para realizar mis estudios de postgrado.

A mis amigos y compañeros de estudio y de trabajo, por su amistad, colaboración y apoyo durante el desarrollo de mis estudios de maestría, a todos muchas gracias.

DEDICATORIA

A DIOS Todopoderoso por haberme dado la sabiduría e inteligencia y permitirme terminar con éxitos mis estudios.

A mi querida esposa Blanca Estela Bolaños Q., por el amor que me ha brindado y por apoyarme en todo momento, porque sin su apoyo habría sido más difícil llegar a la meta.

A mis hijas Andrea María y Ana Silvia, porque sus sonrisas fueron fuente de energía para mi labor y por quienes este esfuerzo tiene aún mayor sentido.

A mis padres Felino Revolorio y Maria Antonia Quevedo por apoyarme siempre, en los buenos y malos momentos.

A mis hermanos, hermanas, cuñados y demás familiares que apoyaron mi formación profesional.

REVOLORIO QUEVEDO, A. 1996. Evaluación de la calidad de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede, en la Zona de Amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala.

Palabras clave: *Pinus oocarpa*, bosque de pino, calidad de sitio, índice de sitio, factores ambientales, manejo de bosques, Sierra de las Minas.

RESUMEN

El conocimiento de las calidades de sitio, es una valiosa herramienta para el desarrollo de trabajos silvícolas y para la toma de decisiones en relación al bosque. Debe ser uno de los primeros aspectos a tomar en consideración en cualquier programa o proyecto de manejo forestal.

El principal objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad de sitio para los rodales naturales de *P. oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.

Se instalaron en el campo un total de 38 parcelas circulares de 500 m². En cada parcela se levantaron cinco subparcela de 10m² de forma cuadrada. En estas subparcelas se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm), a las cuales se les determinaron los análisis químicos completos, materia orgánica y textura. Se evaluó la profundidad efectiva del suelo, la pedregosidad superficial y el grado de erosión. Además, se midió el porcentaje de pendiente, la posición de la parcela dentro de la pendiente y la forma y exposición de la pendiente.

Se estimó la altura dominante, como el promedio de los 100 árboles más altos por ha (5 árboles por parcela), se midió la altura total y el diámetro de todos los árboles de la parcela con un dap mayor a 10 cm; a partir de éstos se cálculo el área basal y el volumen. Se colectaron muestras de ascúculas en dos de los árboles dominantes por parcela, con el objeto de cuantificar el contenido de nutrientes foliares.

En cada parcela fueron tumbados dos árboles dominantes para análisis fustal. Se probó la bondad de ajuste de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards a los pares de datos edad-altura derivados del análisis fustal.

El modelo de intercepto común de la ecuación general de Schumacher explicó mejor la varianza en el crecimiento en altura dominante en relación a la edad de *P. oocarpa*. La ecuación general quedó de la siguiente manera:

$$\ln(\text{hdom}) = 3,4547 - 5,98511 / (\text{Eb}^{0,811934})$$

El modelo de intercepto común derivado de la ecuación general es el siguiente:

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln}(\text{hdom}) - 5,98511(1/\text{Eb}^{0,811934} - 1/\text{Ei}^{0,811934})$$

donde:

Ln(hdom)= logaritmo natural de la altura dominante

Ln(IS) = logaritmo natural del índice de sitio

hdom = altura dominante (m)

Eb = edad base (años)

Ei = edad de medición a partir del dap

El índice de sitio presentó correlaciones significativas con el área basal y el volumen del rodal, lo cual indica que esta variable es una buena predictora del potencial productivo de los sitios muestreados.

El índice de sitio, se relacionó con variables topográficas y edáficas, a efecto de evaluar la relación entre la variación de estos factores ambientales y la productividad del sitio para la especie de interés.

Las variables ambientales que se correlacionaron significativamente ($P < 0,05$) con el índice de sitio de *P. oocarpa* fueron el porcentaje de pendiente ($r = -44\%$), la posición en la pendiente ($r = 35\%$), la forma de la pendiente ($r = 68\%$), la erosión del suelo ($r = -54\%$), la pedregosidad superficial ($r = -52\%$), la profundidad efectiva ($r = 72\%$), el contenido de fósforo de 10-30 cm de profundidad ($r = 45\%$), contenido de potasio a ambas profundidades de muestreo: 0-10 cm ($r = 58\%$), 10-30 cm ($r = 42\%$) y el contenido de calcio de 0-10 cm ($r = 43\%$) y 10-30 cm ($r = 33\%$). No se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre el índice de sitio y el contenido de nutrientes foliares.

El modelo de regresión múltiple ajustado para predecir el índice de sitio de *P. oocarpa* en función de las variables topográficas y edáficas evaluadas, aplicando el método de regresión hacia adelante (Forward) quedó de la siguiente manera:

$$\text{IS (m)} = 11,17 + 0,08(\text{Prof. del suelo}) + 0,0154 K_{10-30} + 0,8146 Ca_{0-10}$$

$$R^2 = 67\%$$

$$\text{C.V.} = 9,9\%$$

$$R^2_{\text{aj.}} = 64\%$$

$$\text{Error estándar} = 1,9\text{m}$$

Los modelos ajustados, conllevan la incertidumbre de las siguientes fuentes de variación: variación genética de la especie entre los sitios de muestreo, variación ambiental no evaluada, errores de medición y la falta de ajuste del modelo.

REVOLORIO QUEVEDO, A. 1996. Quality site assessment for *Pinus oocarpa* Schiede, in the Sierra de las Minas Biosphere Reserve Damping Zone, Guatemala.

Keywords: *Pinus oocarpa*, pine forest, site quality, site index, environmental factors, forest management, Sierra de las Minas

SUMMARY

To understand the site qualities of a place is a key element in order to develop silvicultural activities and to make decisions within a forest. It should be one of the first aspects to be considered in any forest management project or program.

The main objective of this research was to evaluate the site quality for *P. oocarpa* Schiede natural stands in the Sierra de las Minas Biosphere Reserve damping zone.

Thirty eight circular plots measuring 500 m² each were established at the field. Within them, five 10m² square subplots were arranged with the dominant tree located in the middle of each subplot. Soil samples at two depths (0-10 cm and 10-30 cm) were taken from each subplot in order to make complete chemical tests, organic matter and texture evaluations. Soil's effective depth, superficial rockiness and erosion rate were also assessed. Besides that, the slope's percentage was measured as well as the plot's setting on the slope and the slope's shape and exposition.

The dominant height was estimated obtaining an average of the 100 tallest trees per ha (5 trees per plot). Total height and diameter of all trees present in the plot with a dap over 10 cm were measured in order to determine the trees' basal area and volume. Needle samples were collected from two dominant trees of each plot to quantify the foliar nutrient content.

Two dominant trees from each plot were cut to conduct bole analysis. The adjustment capacity of Schumacher and Chapman-Richard models towards the data pairs age-dominant height derived from the bole analysis was evaluated.

The common intercept model from Schumacher's general equation provided a better explanation of the dominant height growth variance related to *P. oocarpa*'s age. The general equation resulted as follows:

$$\ln(h_{dom}) = 3,4547 - 5,98511 / (E_b^{0,811934})$$

The derived common intercept model of this equation is:

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln}(\text{hdom}) - 5,98511(1/\text{Eb}^{0,811934} - 1/\text{Ei}^{0,811934})$$

Where:

Ln(hdom) = natural logarithm of dominant height
Ln(IS) = natural logarithm of site index
hdom = dominant height (m)
Eb = base age (years)
Ei = measuring age starting from the dap

The site index presented significant correlations regarding the stand's basal area and volume, indicating that this is a good variable to forecast the sampled sites production potential.

The site index was related with other topographic and edaphic variables in order to evaluate the relationship between variation of environmental factors and site productivity for the species under study.

The environmental variables correlated ($P < 0,05$) with *P. oocarpa*'s site index were: slope percentage ($r = -44\%$), slope position ($r = 35\%$), slope shape ($r = 68\%$), soil erosion ($r = -54\%$), superficial rockiness ($r = 52\%$), effective depth ($r = 75\%$), phosphorus content at 10-30 cm ($r = 45\%$), potassium content at both sampling depths: 0-10 cm ($r = 58\%$), 10-30 cm ($r = 45\%$) and calcium content at both sampling depths: 0-10 cm ($r = 45\%$) and 10-30 cm ($r = 33\%$). No statistically significant correlations were found between the site index and the foliar nutrients content.

The multiple regression model adjusted to forecast the site index of *P. oocarpa* in regards to the topographic and edaphic variables under evaluation, applying the regression method in a forward way, resulted as follows:

$$\text{IS (m)} = 11.17 + 0,08(\text{soil depth}) + 0,0154 K_{10-30} + 0,8146 Ca_{0-10}$$

$$R^2 = 67\%$$

$$\text{C.V.} = 9,9\%$$

$$R^{2aj.} = 64\%$$

$$\text{Standard error} = 1,9\text{m}$$

The adjusted models, carry uncertainties regarding the following variation sources: species genetic variation between sampling sites, non-evaluated environmental variation, measurement errors and also more adjustment of the model.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	ix
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE ANEXOS	xvi
1 INTRODUCCION	1
2 OBJETIVOS	3
3 HIPOTESIS	4
4 REVISION DE LITERATURA	5
4.1 Ecología distribución e importancia del <i>Pinus oocarpa</i>	5
4.2 La calidad del sitio: definiciones e importancia	7
4.2.1 El sitio como concepto general	7
4.2.2 Conceptos de calidad de sitio	8
4.2.3 Importancia de la calidad de sitio	8
4.3 Métodos para evaluar la calidad de sitio	9
4.3.1 Utilización de la altura para estimar la calidad del sitio.	11
4.3.2 El índice de sitio como estimador de la calidad del sitio	14
4.4 Curvas de índice de sitio	16
4.4.1 Definición e importancia	16
4.4.2 Construcción de curvas de índice de sitio	17
4.4.2.1 Métodos gráficos	17
4.4.2.2 Métodos matemáticos	17
4.4.3 Determinación de la edad base	21

4.5	El análisis fustal como fuente de datos para ajustar modelos de índice de sitio	23
4.6	Modelos de estimación de calidad de sitio basados en factores ambientales	24
4.7	Algunos factores ambientales asociados con la productividad de los pinos	27
4.7.1	Clima	27
4.7.2	Altitud	28
4.7.3	Factores topográficos	29
4.7.4	Factores edáficos	30
5	METODOLOGIA	33
5.1	Descripción general del área de estudio	33
5.1.1	Ubicación	33
5.1.2	Geología y fisiografía	33
5.1.3	Suelos	35
5.1.4	Elevación y topografía	36
5.1.5	Clima y zonas de vida	36
5.1.6	Vegetación	37
5.2	Diseño de muestreo para la recolección de la información	38
5.2.1	Identificación, y selección de sitios de muestreo	38
5.2.2	Métodos de muestreo	39
5.2.3	Tamaño y forma de parcela	39
5.2.4	Número de parcelas y distribución por sitio	40
5.2.5	Selección de árboles para análisis fustal	42

5.3 Recopilación de información de campo	43
5.3.1 Metodología para el análisis fustal	43
5.3.2 Evaluación de variables topográficas	45
5.3.3 Evaluación de variables edáficas	46
5.3.3.1 Evaluación de la fertilidad	46
5.3.3.2 Evaluación de otras variables	47
5.3.4 Muestreo foliar	48
5.3.5 Evaluación de variables del rodal	49
5.3.4 Métodos de análisis de laboratorio	50
5.5 Analisis de la información	51
5.5.1 Ordenación de la información de campo	51
5.5.2 Construcción y selección de modelo para estimar el índice de sitio en base a la altura y la edad	51
5.5.2.1 Graficación de datos edad-altura	52
5.5.2.2 Modelos probados	52
5.5.2.3 Selección de modelo de mejor ajuste	54
5.5.2.4 Selección entre intercepto común y pendiente común	55
5.5.3 Análisis de la variación edáfica y topo- gráfica y su efecto sobre la productividad de <i>P. oocarpa</i>	57
6. RESULTADOS	60
6.1 Caracterización de la variación en la productividad del sitio	60
6.1.1 Construcción del modelo de índice de sitio	60
6.1.2 Selección entre el modelo de intercepto común y pendiente común	69
6.1.3 Construcción de curvas de índice de sitio y agrupación en clases de sitio	72

6.1.4 Relación entre el índice de sitio y las variables del rodal	75
6.2 Descripción de la Variación ambiental en los sitios de muestreo	79
6.2.1 Variación topográfica	79
6.2.2 Variación edáfica	82
6.2.2.1 Variables físicas	82
6.2.2.2 Variables químicas	84
6.2.2.3 Generalidades sobre la fertilidad de los suelos en los sitios de muestreo	87
6.2.2.4 Relación entre la concentración de nutrientes foliares y nutrientes en el suelo y el índice de sitio.	94
6.3 Asociación entre las variables ambientales y el índice de sitio	97
6.4 Construcción de modelos de predicción de la productividad de <i>P. oocarpa</i> en función de las variables edáficas y topográficas evaluadas	104
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
8. BIBLIOGRAFIA	116
ANEXOS	125

LISTA DE CUADROS

1.	Ubicación y distribución de 38 parcelas temporales de muestreo de <i>P. oocarpa</i> , en la RBSM, Guatemala	41
2.	Parámetros del modelo de Schumacher considerando la edad total y la edad al dap para la estimación del índice de sitio de <i>P. oocarpa</i> , en la RBSM, Guatemala	63
3.	Estadísticos del análisis de varianza para el modelo de Schumacher, considerando la edad total y la edad al dap de <i>P. oocarpa</i> , en la RBSM, Guatemala	63
4.	Variación en la edad requerida para que <i>P. oocarpa</i> alcance la altura de 1,30m, en relación al índice de sitio, en la RBSM, Guatemala	65
5.	Estadísticos obtenidos en la validación para los modelos de intercepto común y pendiente común del modelo de Schumacher	70
6.	Variación en los índices de sitio por parcela, estimados por el modelo de Schumacher, a una edad base de 25 años, para <i>P. oocarpa</i>	73
7.	Distribución de las parcelas de muestreo por clase de sitio y valores máximo, mínimo y medio del índice de sitio dentro de cada clase	74
8.	Correlación entre el índice de sitio de <i>P. oocarpa</i> y las variables del rodal	77
9.	Distribución de frecuencias de las unidades de muestreo en relación a las variables topográficas evaluadas	80
10.	Valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación para las variables físicas del suelo	83
11.	Valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación para las variables químicas del suelo	86
12.	Comparación de concentraciones de nutrientes encontrados en las dos profundidades de muestreo, con los niveles críticos dados por Davey (1983)	88
13.	Valores mínimos, máximo, medios y coeficientes de variación para la concentración de nutrientes foliares y comparación con niveles críticos dados por Davey (1983)	93

14. Correlaciones estadísticamente significativas entre la concentración de nutrientes en el tejido vegetal y los nutrientes en el suelo	95
15. Variación en la concentración de nutrientes foliares en <i>P. oocarpa</i> en relación con la edad de los árboles.	97
16. Coeficientes de correlación ($r\%$) y su nivel de significancia estadística entre el índice de sitio y las variables edáficas y topográficas	98
17. Resultados del análisis de varianza del modelo de estimación del índice de sitio para <i>P. oocarpa</i> , a partir de tres variables edáficas seleccionadas	111
18. Asociación entre las tres variables incluidas en el modelo para estimar el índice de sitio de <i>P. oocarpa</i> y otras variables ambientales incluidas en el estudio	112

LISTA DE FIGURAS

1.	Ubicación de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas, y los macrositios de muestreo	34
2.	Dispersión de los pares de datos edad-altura y comportamiento de las ecuaciones promedio de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards considerando la edad estimada a la altura del pecho	61
3.	Diferencias entre los valores de índice de sitio estimados por los modelos de intercepto común y pendiente común de Schumacher	71
4.	Curvas polimórficas de índice de sitio para <i>P. oocarpa</i> , obtenidas con el modelo de Schumacher considerando la edad a partir del dap	72
5.	Distribución del porcentaje de sitios según deficiencias de nutrientes encontradas a la profundidad de 0-10 cm, según niveles críticos de Davey (1983)	90
6.	Distribución del porcentaje de los sitios según deficiencias de nutrientes encontradas a la profundidad de 10-30 cm, según niveles críticos de Davey (1983)	91
7.	Distribución del porcentaje de sitios según las deficiencias encontradas en la concentración de nutrientes foliares, comparado con los niveles críticos dados por Davey (1983)	92
8.	Relación entre el número de variables y el coeficiente de determinación (R^2) y su desviación estándar, en la estimación del índice de sitio para <i>P. oocarpa</i> , con el modelo de regresión utilizando variables ambientales	105
9.	Valores predichos a partir del modelo generado con tres variables edáficas y los valores observados para el índice de sitio de <i>P. oocarpa</i> en las parcelas de muestreo. RBSM, Guatemala.	109

LISTA DE ANEXOS

1.	Gráficos de las desviaciones de los residuos obtenidos con los modelos de intercepto común y pendiente común en la validación de los modelos	125
2.	Parámetros ajustados de la ecuación de Chapman-Richards, considerando la edad a partir del dap	130
3.	Datos de crecimiento y rendimiento de <i>P. oocarpa</i> por clase de sitio	131
4.	Relación gráfica entre el índice de sitio de <i>P. oocarpa</i> y las variables ambientales con una correlación estadísticamente significativa	133
5.	Coefficientes de correlación entre las variables ambientales que correlacionaron con el índice de sitio para <i>P. oocarpa</i> , con un nivel de $P < 0,05$	139
6.	Matriz de correlación entre los nutrientes foliares encontrados en <i>P. oocarpa</i> en la RBSM	140
7.	Métodos de laboratorio utilizados para el análisis de las muestras de suelo y de tejido vegetal	141

1 . INTRODUCCION

La Sierra de las Minas fue declarada reserva de la biosfera en 1990 por ser una de las más valiosas joyas del patrimonio natural de Guatemala. Es considerada por expertos forestales como uno de los bancos de semillas de coníferas tropicales más importantes del mundo, existiendo hasta la fecha más de 10 especies de coníferas reportadas dentro de esa Reserva (Defensores de la Naturaleza 1992).

Los bosques de la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas (RBSM), están constituidos principalmente por coníferas y la especie dominante y más ampliamente distribuida y utilizada es *Pinus oocarpa*¹. Esta especie es a su vez una de las especies maderables más importantes de Guatemala.

No obstante la importancia ecológica, biológica y económica de ese tipo de bosques de la RBSM, en su mayoría han estado sometidos a operaciones de aprovechamientos forestales sin considerar bases técnicas y científicas que garanticen su uso sostenible, lo cual ha significado pérdida y degradación genética del recurso.

La presión sobre los bosques naturales aún existentes en la RBSM (principalmente en la zonas de amortiguamiento), constituyen quizá la principal amenaza a la integridad de esa Reserva, situación que demanda la ejecución de acciones inmediatas que orienten y permitan la recuperación de ese recurso y el uso sostenible de los remanentes de bosque existente en esas zonas.

¹Información dada por Oscar Nuñez, Director de la RBSM, agosto 1995.

Una de las limitantes para lograr el manejo sostenible de los bosques de coníferas de la RBSM, es la falta de información técnica y científica (inventarios de recursos naturales, evaluaciones de calidades de sitio, estudios de crecimiento y rendimiento), necesaria para orientar y fundamentar las decisiones que se tomen en materia forestal.

La determinación de la calidad del sitio o productividad de la tierra para una o varias especies existentes o potenciales, deberá ser uno de los primeros pasos a considerar en un plan de manejo forestal (Doolittle 1958). Por lo tanto, es necesario generar ese tipo de información como punto de partida para la ordenación y el manejo de los bosques de la RBSM.

Con el propósito de contribuir a lograr el manejo sostenible de los bosques de la RBSM, la presente investigación se enfocó a evaluar la calidad de sitio para los rodales naturales de *P. oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la RBSM, generando información que servirá para planificar mejor el manejo forestal de dichos bosques.

Se desarrollaron modelos para estimar el índice de sitio de los rodales naturales de la especie de interés. A partir de estos, se construyó una familia de curvas polimórficas de índices de sitio, que podrán ser aplicadas fácilmente por los técnicos encargados del manejo forestal de los bosques en mención.

Además, se ha desarrollado un modelo para estimar el índice de sitio en función de variables edáficas y topográficas fácilmente medibles, que permitirá estimar la calidad del sitio en aquellas áreas desprovistas de bosques, principalmente donde se ejecuten acciones de reforestación. La información que se ha generado, contribuirá a fundamentar la ordenación forestal que la entidad administradora de la RBSM pretende realizar.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Evaluar el efecto de factores topográficos y edáficos sobre la calidad de sitio del bosque natural de *Pinus oocarpa* Schiede, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.

2.2 Específicos

- 2.2.1 Estimar la productividad² del *Pinus oocarpa* Schiede, en función del crecimiento en altura.
- 2.2.2 Ajustar un modelo matemático a los datos edad-altura de *Pinus oocarpa* Schiede, derivados del análisis fustal de los árboles muestreados, generando un modelo para estimar el índice de sitio de dicha especie.
- 2.2.3 Elaborar a partir del modelo ajustado, una familia de curvas de índice de sitio que represente el patrón de crecimiento en altura de *Pinus oocarpa* Schiede, para las condiciones de sitio del área de estudio.
- 2.2.4 Caracterizar la variación topográfica y edáfica en el área de estudio.
- 2.2.5 Relacionar algunas variables edáficas y topográficas con el índice de sitio, como base para definir las calidades de sitio en áreas desprovistas de bosques en la RBSM.

²En este documento el término "productividad" se utilizará tal y como ha sido desarrollado en estudios forestales y no como se utiliza normalmente en la ciencia ecológica.

3 . H I P O T E S I S

Con base en los objetivos de este estudio, se plantea la siguiente hipótesis:

"La variación ambiental (topográfica y edáfica) está asociada con la productividad de los rodales naturales de *Pinus oocarpa* Schiede en la zona de estudio y es posible predecir su productividad a partir de algunas variables ambientales.

4 . REVISION DE LITERATURA

4.1 Ecología, distribución e importancia del *Pinus oocarpa* Schiede

La especie *P. oocarpa*, se distribuye ampliamente a través de Centroamérica, desde el sur de México hasta los 12° 40' N, en Nicaragua. Es la especie con mayor rango de distribución de todos los pinos latinoamericanos. Generalmente a lo largo de la parte sur de su rango, sólo se encuentra la subespecie *oocarpa* (Styles y Hughes 1989).

La distribución de *P. oocarpa* subespecie *oocarpa*, está restringida principalmente a los sitios ecológicos más pobres y secos con una precipitación anual entre 700 a 1 400 mm, y una estación seca de 4 a 5 meses (Prats 1962; MARENA-DANIDA 1994). Las características sobresalientes de su habitat natural son la resistencia a la sequía, su tolerancia al calor e incendios y la amplitud de su distribución altitudinal (Prats 1962).

En Guatemala *P. oocarpa* se encuentra en forma natural en las siguientes zonas de vida: Bosque húmedo montano Subtropical, Bosque húmedo Subtropical y Bosque muy húmedo montano Subtropical, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Aguilar *et al.* 1988); lo cual indica que aunque es una especie poco exigente en cuanto a condiciones de humedad, también prospera en regiones con mayor precipitación.

A menudo, se le encuentra creciendo sobre suelos superficiales con poco humus, derivados de granito con abundante cuarzo o bien de rocas volcánicas, principalmente toba riolítica e ignimbritas, con la característica general que son suelos con buen drenaje, pero poco fértiles (Zamora 1981; Aguilar *et al.* 1988; MARENA-DANIDA 1994).

Los bosques dominados por *P. oocarpa*, por ser más secos, tienden a contar con un sotobosque estacional, dominado por gramíneas, lo que los hace altamente susceptibles a incendios en la época seca (MARENA-DANIDA 1994).

Existen diferentes opiniones en relación a la distribución altitudinal de esta especie; algunos autores reportan su existencia desde los 200 msnm (Styles y Huhges 1989), hasta los 2 800 msnm (Aguilar *et al.* 1988). Sin embargo, la mayoría coinciden en un rango que va desde los 400 a 600 msnm hasta los 2 200 a 2 400 msnm (Prats 1962; Zamora 1981; Tasaico 1976).

En el límite más bajo del rango altitudinal, la especie se traslapa con *Pinus caribaea*, formando híbridos. Algunas veces puede crecer naturalmente a altitudes bajas, (200 msnm) en Guatemala y México, produciendo semilla fértil. También a grandes altitudes se han reportado híbridos en combinación con el *Pinus maximinoii* (Styles *et al.* 1982). En la zona de Chimaltenango, Guatemala (1 580 msnm) *P. oocarpa* presenta codominancia con *Pinus pseudostrobus* (Rojas 1988).

Dentro de este amplio rango de distribución altitudinal, esta especie se desarrolla mejor entre los 800 y 1 600 msnm (Pérez *et al.* 1990). *P. oocarpa* forma rodales puros generalmente entre los 1 200 a 1 500 msnm en Guatemala (Tasaico 1976).

De las 20 especies de coníferas reportadas para Guatemala, ésta es la más abundante y una de las especies maderables más utilizadas (Aguilar *et al.* 1988).

La madera de *P. oocarpa* tiene propiedades excelentes, además, es una buena productora de resina. *P. oocarpa* es casi única en su capacidad de rebrote en la base, cuando el tallo y la copa han sido destruidos por el fuego, lo cual la hace más resistente a los

incendios (Holdridge 1975). Este conjunto de características hacen que sea una de las especies forestales de mayor importancia para Guatemala.

4.2 La calidad del sitio: definiciones e importancia

4.2.1 El Sitio como concepto general

El sitio es un lugar definido sobre la superficie de la tierra, sobre el cual influyen diferentes factores: suelo, clima, vegetación, topografía, material parental (roca madre) y actividades antropogénicas (Salas G. De las 1974).

El término "sitio", tal y como se define para terrenos forestales, implícitamente incluye todo el complejo de condiciones ambientales.

Parámetros biológicos del sitio que no pueden ser medidos o fácilmente estimados, normalmente no se incluyen en la predicción de la calidad del sitio. Sin embargo, sus efectos individuales o combinados, pueden tener un efecto significativo en el crecimiento del árbol, limitando así la precisión de los métodos tradicionales de evaluación del sitio (Ortega y Montero 1988; Stiff *et al.* 1991).

Los factores del medioambiente que determinan la calidad del sitio y por lo tanto, el potencial de crecimiento o productividad de los árboles del rodal, se identifican corrientemente entre los forestales como factores del sitio (Donoso 1981).

4.2.2 Conceptos de calidad de sitio

En el contexto del manejo forestal, la calidad de sitio puede ser definida como la capacidad potencial de un sitio de sostener una producción de madera de una especie o tipo de bosque en particular, producto de una interrelación de factores topográficos, edáficos, bióticos y climáticos (Salas G. De Las 1974; Clutter *et al.* 1983; Stiff *et al.* 1991).

En términos generales cuando se evalúa la calidad de sitio, se está evaluando la productividad de ese sitio en función de su capacidad para producir madera en un tiempo determinado (Daniel *et al.* 1982).

La calidad de sitio es algo dinámico y puede ser modificada por la silvicultura o actividades que ejercen su influencia sobre los factores de sitio (Heiberg y White 1976).

Diferentes tratamientos aplicados al suelo y/o al bosque pueden jugar un papel importante en cuanto a mejorar, mantener o empeorar la calidad de sitio. Así por ejemplo, la ejecución de prácticas de conservación de suelos, tales como obras de conservación, estructuras de drenaje, uso de abonos verdes, etc, pueden contribuir a mejorar la capacidad potencial de producción de madera de un sitio; mientras que actividades de extracción como la compactación y/o exposición del suelo a la erosión, pueden degradar la calidad del sitio.

4.2.3 Importancia de la calidad del sitio

Cada sitio tiene características propias de clima, fisiografía, suelo y vegetación, que le permiten proveer determinados factores de crecimiento al árbol. Por otra parte,

cada especie se desempeña mejor que las otras en un sector determinado dentro de las gradientes ambientales (Finegan 1994).

En la medida que las condiciones de un sitio se alejan de los gradientes óptimos requeridos por una especie, la calidad de ese sitio para esa especie normalmente disminuye.

La productividad forestal varía considerablemente en función de la calidad de sitio. Por tal razón es muy importante conocer y evaluar las variables que más influyen en la calidad de un sitio para una especie determinada. El conocimiento de la calidad del sitio, es una valiosa herramienta para planificar trabajos silvícolas y para tomar decisiones económicas en programas de ordenación forestal y de reforestación (Castaños 1962).

Clutter *et al.* (1983) señalan que, una efectiva evaluación de la calidad de sitio tiene aplicación práctica debido a que los productos generados por un bosque dependen de la calidad del sitio y la densidad del rodal. Inversiones justificables en buenos sitios, pueden constituir una mala inversión en otros sitios menos productivos. Por otra parte, la respuesta a diferentes tratamientos silviculturales difiere marcadamente entre áreas con distintas calidades de sitio.

4.3 Métodos para evaluar la calidad de sitio

Diversos métodos han sido desarrollados para cuantificar la calidad de sitio. Algunos investigadores (Carmean 1975; Clutter *et al.* 1983), clasifican éstos métodos en directos o indirectos, dependiendo de la presencia o ausencia de las especies de interés en los sitios a evaluar, y de las variables a considerar.

Según Clutter *et al.* (1983), los métodos directos a diferencia de los indirectos, requieren la existencia de la especie de interés; y de acuerdo con esos autores, los métodos se pueden clasificar de la siguiente manera:

A. Métodos directos:

- ◆ estimación por medio de registros históricos del rendimiento en parcelas permanentes de muestreo;
- ◆ estimación con base en datos del volumen del rodal;
- ◆ estimación con base a datos de la altura del rodal.

B. Métodos Indirectos:

- ◆ estimación a partir de relaciones entre especies del dosel superior;
- ◆ estimaciones a partir de las características de la vegetación menor;
- ◆ estimación a partir de factores edáficos topográficos y climáticos.

Otros autores como Vincent (1975) y Hägglund (1981), en función de las variables a evaluar, agrupan los diferentes métodos, en dos grandes tipos:

- evaluación en base a variables del rodal o características de la vegetación (volumen, altura, edad de árboles del rodal, plantas indicadoras);
- evaluación en base a factores del medio ambiente (topografía, suelo, clima).

Aún no existe un criterio unificado en relación a cuál método es mejor; sin embargo, parece ser que el método más ampliamente conocido, es el que utiliza datos de la altura del rodal como índice de la productividad del sitio (Alder 1980). El crecimiento en altura de los árboles es la medida más práctica, consistente y útil como indicador de la calidad de sitio (Davis 1966, citado por Herrera 1996).

Una descripción de los diferentes métodos de evaluación de calidad de sitio, son dados en las revisiones hechas sobre este tema por: Carmean (1975); Hägglund (1981); Clutter *et al.* (1983); Ortega y Montero (1988).

En el presente documento se describen únicamente el método basado en la altura del rodal, específicamente el concepto de índice de sitio, y la construcción de modelos de índice de sitio a partir de variables topográficas y edáficas, por ser la metodología utilizada en la realización de esta investigación.

4.3.1 Utilización de la altura para estimar la calidad de sitio

Existen diferentes formas de expresión de la altura de un bosque para la evaluación de sitios; algunos conceptos utilizados al respecto son:

a) Altura media

La altura media corresponde al promedio aritmético de la altura de todos los árboles de una muestra (Ortega y Montero 1988). Una modificación de este concepto es dado por Vincent (1975) quien utiliza el término de altura promedio al referirse al

promedio de la altura de los árboles dominantes y codominantes.

Según Alder (1980), la altura media de un rodal es sensible no solo a la edad y a la clase de sitio, sino también a la densidad del rodal, por lo que sugiere el uso de la altura dominante que es menos sensible a diferencias de densidad del rodal.

En algunos casos, la altura promedio puede estar influenciada por la altura de los árboles suprimidos y por consiguiente no reflejaría el potencial productivo del material genético en ese sitio; sino el tipo de manejo que se le ha aplicado a la plantación (Campos 1989b).

b) Altura dominante

La altura dominante es definida como el promedio de la altura de los árboles más gruesos o de mayor diámetro del rodal. (Alder 1980 y Hägglund 1981)

Según Alder (1980), la altura dominante puede definirse de varias formas, pero la definición más ampliamente aceptada es la de la altura promedio de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea. Quizá por sus ventajas prácticas, ya que es más fácil medir el dap que la altura.

El uso de los árboles más gruesos tiene el inconveniente de que a veces los árboles de mayor diámetro no son los más altos, ni los más representativos del sitio. Por otra parte, un desarrollo mayor en diámetro puede ser el resultado de una combinación de factores casuales de micrositio o de la densidad (Vincent 1975). Este autor utiliza otro concepto, "la altura mayor" la cual define como: la altura promedio de los 100 árboles más altos por hectárea. Este concepto se ha venido utilizando como sinónimo de la altura dominante en varios estudios de evaluación de la calidad de sitio.

La altura de los árboles dominantes (de crecimiento libre) está más relacionada que cualquier otra variable con la capacidad de producción del sitio (Campos 1989b). Además, se considera que es bastante independiente de la densidad del rodal, aunque esto no es siempre verdadero; densidades muy altas pueden afectar el crecimiento en altura del rodal (Hägglund 1981).

El efecto de la densidad del rodal sobre el crecimiento en altura, depende de las especies, de acuerdo a sus hábitos de crecimiento y habilidad para expresar dominancia. Por lo tanto es necesario conocer algo acerca de los efectos de la densidad sobre el crecimiento en altura de una especie, para hacer una interpretación adecuada de las mediciones del índice de sitio (Lynch 1958, citado por Daniel *et al.* 1982).

La influencia de la densidad en las evaluaciones de la calidad de sitio, se puede reducir evitando los bosques con densidades extremas. El uso de un rango de áreas basales medias puede guiar la selección de los sitios a muestrear (Castaños 1962).

Según Ortega y Montero (1988), la altura dominante como parámetro indicador de la producción del sitio, tiene las siguientes desventajas:

- ♦ dificultad interpretativa de establecer límites en la dinámica evolutiva de la masa dominante. Esto es especialmente el caso en bosques naturales;
- ♦ puede producirse un intercambio entre los árboles que forman el estrato dominante, al menos en las primeras etapas de desarrollo. Campos (1989c) encontró que en plantaciones de especies de rápido crecimiento, esto se da únicamente en los primeros 2-3 años;

♦ árboles destacados en determinadas ocasiones representan condiciones excepcionales de origen genético o edáfico, ajenas a la calidad media del sitio. Esto podría ser problemático en muy pocos casos y únicamente cuando la unidad de muestreo es muy pequeña.

En relación a la segunda desventaja, Stiff *et al.* (1991) señala que, para el caso específico de *P. oocarpa*, una especie heliófita intolerante a la sombra, los árboles dominantes y codominantes deberían retener el mismo estrato durante toda su vida. Así, la posibilidad de muestrear árboles con supresión pasada es remota.

En el caso de los bosques naturales discetáneos, la posición dominante de un árbol, puede deberse a una mayor edad. Por lo que, árboles cuyas edades sean muy superiores a los valores del resto de dominantes y codominantes, no deben ser considerados en el muestreo para determinar la altura dominante, ya que su inclusión ayudaría a desvirtuar los valores medios del sitio (Castaños 1962).

En una evaluación del comportamiento de la altura dominante como medida de la calidad de sitio para *Araucaria angustifolia* Fernández *et al.* (1994), encontraron que esta variable era independiente de la densidad inicial, en rodales de 6 y 19 años. Además, relacionaron la altura dominante con el volumen total, concluyendo que es una variable adecuada para ser utilizada en evaluaciones de calidad de sitio.

4.3.2 El índice de sitio como estimador de la calidad del sitio

Varios investigadores coinciden en señalar al índice de sitio, como el método más conocido y ampliamente utilizado para

estimar la productividad de un sitio (Carmean 1975; Hägglund 1981; Monserud 1987; Ortega y Montero 1988).

El concepto más general y concreto del índice de sitio, es aquel que lo define como: la altura promedio que alcanzan los árboles dominantes dentro del rodal a una edad determinada, llamada edad típica, edad índice o edad base (Monserud 1987; Ortega y Montero 1988; Stiff *et al.* 1991).

Curtis (1964) señala que, aunque el índice de sitio sigue siendo útil para estimar la calidad del sitio, éste tiene limitaciones que no siempre son reconocidas:

- ◆ la altura es sólo uno de los componentes del volumen y el índice de sitio no es sinónimo de la productividad en volumen;
- ◆ el índice de sitio provee poca información acerca de las relaciones ecológicas que suelen influir en la productividad alcanzada;
- ◆ la estimación del índice de sitio depende de la precisión con que se hayan construido las curvas de índice de sitio.

Para asegurar que los árboles son en efecto indicadores del potencial del sitio para producir madera, y así mejorar la precisión en la determinación del índice de sitio; es necesaria una cuidadosa selección de los "árboles del sitio" y un buen análisis fustal (Monserud 1987).

En bosques naturales, para aplicar correctamente el método de índice de sitio basado en las relaciones edad/altura, se deben considerar los siguientes requisitos (Castaños 1962):

- ◆ los árboles muestreados deben contar con una edad a la cual el efecto completo de los factores de sitio se halla manifestado en su desarrollo;

- ◆ en cada sitio se debe muestrear un número considerable de árboles para obtener valores medios de altura dominante-edad, verdaderamente representativos del sitio.

Una común suposición respecto al índice de sitio es que el substrato genético es constante (Monserud 1987). Pruebas de procedencia de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) demostraron que el índice genético estaba más relacionado con el índice de sitio que otras variables del medio ambiente. Es decir que la variación genética explicó gran parte de la variación existente en la productividad de la especie. En conclusión, este autor señala que, si se espera dilucidar la causas de la productividad del sitio, se debe considerar además de las variables tradicionalmente evaluadas, la estructura genética de los árboles adaptados a ese medio ambiente.

4.4 Curvas de índice de sitio

4.4.1 Definición e importancia

La mayoría de los métodos de evaluación de la calidad de sitio basados en datos de la altura del rodal, involucran el uso de curvas de índice de sitio. Estas son una familia de patrones gráficos de desarrollo de la altura a una edad determinada, a las cuales se asocian símbolos o números con propósitos de referencia (Salas G. De Las 1974; Clutter *et al.* 1983). La construcción de curvas altura-edad para diferentes clases de sitio, es el primer paso en la construcción de modelos de crecimiento y rendimiento (Alder 1980).

Las curvas de índice de sitio han sido y son ampliamente usadas, tanto por su fácil interpretación y alta significación productiva como por su utilización práctica para la correcta

aplicación de las tablas de producción (Ortega y Montero 1988).

4.4.2 Construcción de curvas de índice de sitio

Existen dos formas para construir curvas de índice de sitio: por métodos gráficos y por métodos numéricos o análisis de regresión (Alder 1980; Ortega y Montero 1988).

4.4.2.1 Métodos gráficos

Los métodos gráficos se refieren a la representación de la altura versus la edad sin la utilización de fórmulas o modelos (Ortega y Montero 1988).

La construcción de curvas de índice de sitio por el método gráfico, consiste en graficar los datos edad-altura y luego dibujar manualmente tres curvas a través de la dispersión de los datos: una curva delimitando el borde superior de los datos, otra delimitando el borde inferior y una tercera siguiendo la tendencia central (Alder 1980).

Las principales objeciones a este método son que las curvas producidas dependen en gran parte del juicio de la persona que realiza el trabajo, y los datos extremos provienen de muy pocas parcelas (Alder 1980, Ortega y Montero 1988). Diferentes modificaciones de este método son analizadas por Ortega y Montero (1988).

4.4.2.2 Métodos matemáticos

Los métodos matemáticos de ajuste de curvas de índice de sitio, tienen una ventaja considerable sobre los métodos gráficos

$$\text{Ln (Hd)} = a + b/E^k \quad [4.1]$$

donde: Ln (Hd) = logaritmo natural de la altura dominante
 a,b y k = coeficientes estimados por regresión
 E = edad base.

Los coeficientes de la ecuación [4.1] pueden ser estimados por una regresión lineal de mínimos cuadrados, o en el caso que los datos altura/edad provengan de parcelas permanentes o de análisis fustal, puede utilizarse la regresión jerárquica que resulta en un mejor ajuste (Hughell 1991).

El procedimiento de la curva guía ha sido criticado porque supone que la altura dominante ha sido muestreada uniformemente para todas las clases de edad (Monserud 1987), lo cual es difícil de lograr cuando los datos provienen de parcelas temporales (Alder 1980).

b) Método de la ecuación diferencial

La aplicación de este método requiere que los datos edad-altura, provengan de mediciones sucesivas de parcelas permanentes o análisis fustal. Es un método muy flexible y permite producir familias de curvas anamórficas y polimórficas (Clutter *et al.* 1983).

Los procedimientos para la aplicación de este método pueden resumirse en los siguientes pasos (Clutter *et al.* 1983):

- ◆ elección del modelo a utilizar y definición del tipo de curvas a construir (anamórfica o polimórfica);
- ◆ desarrollo de la ecuación diferencial de la ecuación elegida;
- ◆ ajuste de este último modelo a fin de estimar los valores de los coeficientes de regresión;

- ◆ desarrollo de la ecuación con que sea posible estimar el índice de sitio y construir el sistema de curvas.

c) Método de la predicción del parámetro

La aplicación de este método también requiere que los datos provengan de remediciones en parcelas permanentes o análisis fustal y comprende los siguientes pasos (Clutter *et al.* 1983):

- ◆ ajustar una función lineal o no lineal de los datos edad-altura, para el árbol individual o para la parcela;
- ◆ usar la curva o ecuación ajustada para asignar un valor de índice de sitio a cada árbol o parcela;
- ◆ relacionar los parámetros de las curvas o ecuaciones ajustadas de índice de sitio a través de procedimientos de regresión lineal o no lineal.

Una descripción de algunas técnicas matemáticas para el ajuste de curvas de índice de sitio es dada por Alder (1980), quien además desarrolla un ejemplo numérico utilizando regresión jerárquica para ajustar el modelo de Schumacher.

Según Goelz y Burk (1991), algunas de las características deseables que deben tener las ecuaciones utilizadas para derivar las curvas de índice de sitio son:

- ◆ presentar polimorfismo: las curvas polimórficas representan mejor el patrón real de crecimiento del árbol;
- ◆ presentar un punto de inflección: el patrón de crecimiento sigmoide es un paradigma en la biología; aunque algunas series de datos pueden no mostrar un punto de inflección; una función para uso general deberá seguir un punto de inflección;

- ◆ mostrar una asíntota: aunque la altura de un árbol incrementa anualmente, una asíntota asegura que la altura no es ilimitada a edades viejas. Idealmente la asíntota deberá ser la misma función del índice de sitio, tal que incremente cuando incrementa el índice de sitio. El parámetro de la asíntota puede ser pobremente estimado si las alturas a edades viejas no son incluidas en la serie de datos analizados;
- ◆ presentar un comportamiento lógico: la ecuación no deberá generar valores irracionales de altura. Si la altura decrece sobre un rango de edad, la forma de la ecuación deberá ser ajustada o descartada;
- ◆ presentar un fundamento teórico;
- ◆ presentar la propiedad de la edad base invariante: las curvas de edad base invariante, son más generales, y estas pueden predecir la altura a cualquier edad teniendo la altura y cualquier otra edad.

4.4.3 Determinación de la edad base

Un aspecto fundamental en la construcción de una familia de curvas de índice de sitio, es la determinación de la edad base; la cual se define como la edad a la que se cuantifica y se fija el índice de sitio.

La edad índice, se fija generalmente con base a la longevidad de la especie estudiada. El principio básico es usar una edad fija, con el objeto de diferenciar alturas que a su vez sirvan para valorizar la calidad del sitio en estudio (Castaños 1962).

En condiciones normales de desarrollo en altura, lo habitual es tomar la edad base próxima a la mitad del turno, al final del turno, o al finalizar el crecimiento en altura de la especie (Ortega y Montero 1988). Estos autores señalan además que, la elección de una u otra edad dependerá del turno y del conocimiento que se tenga sobre el patrón de crecimiento de la especie.

El criterio de seleccionar la edad base a la edad de terminación del máximo crecimiento en altura, tiene la ventaja de que a partir de ese punto no se van a producir cambios en la posición de las curvas. La utilización de la edad próxima a la mitad del turno, en cambio, tiene la ventaja de poder conocer la calidad de sitio en masas jóvenes y predecir las producciones finales (Ortega y Montero 1988, Stiff *et al.* 1991).

En la elección de la edad base se deben tomar en cuenta los siguientes criterios (Hughell 1991):

- que sean suficientes años para distinguir diferentes índices de sitio con una precisión aceptable;
- que se ubique hacia el final del turno de la especie;
- que esté bien representada con los datos de crecimiento disponibles;
- que se ajuste, hasta donde sea posible, con las edades base utilizadas en otros estudios similares.

Es importante además considerar las diferentes fuentes de datos a partir de los cuales se pueden ajustar las ecuaciones de índice de sitio. Según Clutter *et al* (1983), los datos para el desarrollo de ecuaciones de índice de sitio pueden provenir de tres fuentes:

- ♦ mediciones de la altura y edad del rodal en parcelas temporales;

- ♦ mediciones de la altura y la edad sobre el tiempo en parcelas permanentes;
- ♦ reconstrucción de patrones de desarrollo de la edad/altura para arboles individuales a través de técnicas de análisis fustal.

Esta última fuente de datos, fue utilizada en la presente investigación, la cual se describe en la siguiente sección.

4.5 El análisis fustal como fuente de datos para ajustar los modelos de índices de sitio.

El análisis fustal es un procedimiento que permite conocer el crecimiento e incremento del árbol durante su vida. Para esto es necesario cortar el árbol y trocearlo o dividirlo en secciones (rodajas) transversales en las cuales se identifican y miden los anillos de crecimiento .

Una descripción detallada del procedimiento para realizar el análisis fustal se encuentra en Anuchin (1970) y Klepac (1976).

Según Monserud (1984), la utilización de datos edad-altura provenientes de análisis fustal, usualmente resulta en una evaluación más realista del potencial productivo del sitio, en comparación con los datos provenientes de parcelas temporales.

Este autor, señala que las ventajas del análisis fustal son:

- ♦ permite obtener más información de cada árbol muestreado (series de crecimiento real);
- ♦ la mayoría de procedimientos de análisis fustal permiten la estimación de patrones polimórficos de crecimiento de altura;

- ♦ la altura de los árboles del sitio a una edad índice (índice de sitio) es realmente observada para cada parcela por medio del análisis fustal. Mientras que el índice de sitio por medio de la curva guía puede solamente ser inferida por suposiciones que frecuentemente no son realistas, como por ejemplo, se asume que en todos los sitios se ha muestreado por igual todas las clases de edades.

Una de las limitantes que presenta el procedimiento del análisis fustal en regiones fuera de las zonas templadas, es la identificación de los anillos de crecimiento (presencia de falsos anillos). Stiff et al. (1991) menciona que, los pinos de la región central de Honduras, con frecuencia presentan dos o más anillos por año, los cuales son producidos debido a dos o más estaciones lluviosas separadas por períodos secos. El mismo autor señala que, los incendios (follaje quemado) pueden afectar la producción de anillos hasta unos tres años después del incendio.

Estudios realizados en Guatemala donde se utilizó análisis fustal en *P. oocarpa*, (Rojas 1988; Itzep 1995) y *P. pseudostrobus*, (Escobedo 1995), no informan de ningún tipo de problema con la identificación, conteo y medición de anillos de crecimiento.

4.6 Modelos de estimación de índice de sitio basados en factores ambientales

El índice de sitio o las curvas de índice de sitio descritas en los incisos anteriores, son útiles para predecir el potencial de producción cuando se aplican a rodales existentes (Alder 1980). Sin embargo, en áreas descubiertas de bosque o donde los rodales

existentes no reúnen las condiciones deseables para determinar el índice de sitio, las características topográficas y edáficas pueden ser muy útiles para estimar la productividad del sitio (Carmean 1975, Brown y Loewenstein 1978).

Factores estables en el tiempo como la topografía y el suelo, explican una proporción significativa de la calidad de sitio inherente, y su potencial productivo (Ortega y Montero 1988; Stiff *et al.* 1991).

Según Alder (1980), los modelos para predecir clases de sitio en función de factores ambientales se construyen de acuerdo a las siguientes etapas:

- ◆ construcción de curvas de índice de sitio o clases de sitio para bosques existentes en parcelas de muestreo;
- ◆ recolección de datos ambientales en cada parcela de muestreo;
- ◆ transformación y selección de variables ambientales para producir un modelo predictivo;
- ◆ validación del modelo de predicción.

La forma más común de relacionar el índice de sitio con la variables de sitio es mediante alguna técnica o procedimiento de regresión múltiple (Hägglund 1981). Al respecto, Campos (1989a) señala que, las técnicas automatizadas de regresión múltiple para la construcción de modelos predictivos, puede no permitir conocer aspectos importantes de las variables, tales como: asociaciones no lineales, errores de medición y colinealidad en las variables de predicción. Además, se debe evaluar y corregir el grado y fuentes de colinealidad antes de iniciar cualquier análisis de regresión.

Este autor, describe un procedimiento para corregir los problemas de colinealidad y define criterios para la selección de las variables a incluir en el modelo de predicción.

Para que un modelo de estimación de sitio basado en factores ambientales sea efectivo, debe tener un buen ajuste y el menor número posible de variables predictoras, preferiblemente no más de tres o cuatro. Estas variables deben ser de valor práctico que puedan determinarse rápidamente utilizando los equipos convencionales disponibles (Alder 1980; Campos 1989a).

Varios investigadores: Monserud (1988); Mader (1976); Bara y Toval (1983), coinciden en señalar que, los modelos de predicción en función de variables ambientales raramente logran explicar más del 60% de la variabilidad existente.

Campos (1989c), señala que la variación en la productividad de una especie puede ser dividida en tres componentes principales:

- ◆ la variación causada por cambios en el medio ambiente que han sido medidos, y por lo tanto podrían explicar dicha variación;
- ◆ la variación causada por el error inherente a la medición de la productividad y por la variación local dentro de un mismo sitio y;
- ◆ la variación residual que no puede ser explicada por ninguno de los dos componentes anteriores y que es básicamente una característica de los datos.

El reconocimiento de las fuentes más importantes de variación no explicada es un valiosa ayuda en la interpretación de los resultados y el entendimiento biológico y las limitaciones estadísticas de esta clase de estudio (Campos 1989c). Según este autor, entre los factores que pueden determinar la variación no

explicada, están: la variación genética, variación residual ambiental, diferencias en los tratamientos silviculturales, errores de medición y transcripciones, y la incapacidad de la variable respuesta y el modelo propuesto para estimar la productividad del sitio.

Los resultados obtenidos en los estudios suelo-sitio deben ser considerados solamente como correlaciones y no como evidencia de relaciones de causa y efecto (Carmean y Schmidt 1987).

4.7 Algunos factores ambientales asociados con la productividad de los pinos

4.7.1 Clima

Según Donoso (1981), la precipitación y la temperatura son los factores del clima que tienen mayor influencia sobre la distribución y el crecimiento de los bosques, y pueden usarse como índice de productividad forestal a nivel regional.

Este autor señala que, aunque se han establecido correlaciones entre la precipitación y el crecimiento, éste factor está fuertemente afectado por las características del suelo y de la topografía, e interactúa con la temperatura de tal modo que por si solo es un factor de poco valor como indicador de la productividad del sitio.

Stiff *et al.* (1991), encontraron que la productividad de *P. oocarpa* en Honduras, aumentaba positivamente con la precipitación; sin embargo, señalan que su efecto se debe principalmente a la forma en que se distribuyen las lluvias durante el año.

La distribución de las lluvias juega un papel importante en la productividad de los pinos. Al respecto Wolffsohn (1982) encontró que *P. caribaea* puede comportarse bien en cualquier clima húmedo tropical, pero hay una tendencia a formar "cola de zorro" (característica no deseable según este autor) en lugares sin época seca bien diferenciada. Otras especies de pino como *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. arizonica*, crecen en clima frío o templado-frío, pero solamente donde hay una estación seca bien definida (Verduzco *et al.* 1962).

Por lo general, el efecto de las variables climáticas sobre la calidad de sitio, se puede notar sólo en regiones relativamente amplias; sin embargo, la topografía puede causar cambios en variables climáticas en áreas relativamente pequeñas (Barros 1981).

4.7.2 Altitud

La altitud o altura sobre el nivel del mar, es un importante factor que influye en la variación geográfica de la temperatura. En general, la temperatura del aire disminuye con el aumento de altitud debido a que la atmósfera se hace menos densa y más seca, siendo, por lo tanto, menos capaz de absorber calor (Donoso 1981).

Cada especie tiene un rango altitudinal donde se desarrolla mejor. Para el caso del *P. oocarpa* se ha determinado que aunque tiene un amplio rango de distribución, ésta se desarrolla mejor entre los 800 a los 1 600 msnm (Pérez *et al.* 1990). Es de esperarse que dentro de este rango altitudinal la especie exprese mejor su potencial productivo bajo diferentes factores del sitio.

Musalem y Orantes (1982), encontraron que en Zoquiapan México, plantaciones de *Pinus hartwegii* Lind., no desarrollaron bien en altura, debido a que su rango de distribución natural se encuentra

a mayores elevaciones (2 800- 4 000 msnm).

Según Castaños (1962), después de la profundidad total del suelo, la altitud es el factor que más explica la variación del índice de sitio para *Pinus patula* en la región norte de Oaxaca, México; por su relación con la temperatura y la precipitación pluvial.

4.7.3 Factores topográficos

La topografía se relaciona con el microclima, y a través de sus tres elementos: aspecto, exposición y posición modifican el contenido de humedad del suelo y el régimen de nutrición. Así, tiene una marcada influencia sobre la calidad del sitio (Auten 1945; Barros 1981).

Donoso (1981), menciona que, la exposición y pendiente tienen un notable efecto sobre la distribución de la vegetación en las regiones montañosas.

No hay un criterio unificado en cuanto a cuál es la exposición óptima para el desarrollo de los pinos, pero sí diversos autores reconocen la importancia del factor exposición en relación al microclima.

En el norte de Oaxaca, México, rodales de *P. patula* con exposiciones oeste tienen índices de sitio hasta 2.5 veces mayores que aquellos con exposición este, cuando el resto de variables permanecen aproximadamente iguales (Castaños 1962).

Estas diferencias, las atribuye el autor al hecho que la exposición tiene influencia sobre la insolación, la temperatura, los vientos y la humedad del suelo y aire. Las laderas con

exposición oeste en ese estudio, reciben mayor radiación que aquellas con exposición este. Los pinos por ser especies heliófitas, es de esperar que tengan un mejor desarrollo en aquellos sitios donde la exposición de la pendiente permita una mayor insolación.

Vásquez (1987) observó que, en plantaciones de *P. caribaea* var. *hondurensis*, la posición topográfica y el drenaje interno tenían una relación aparente directa con la calidad de sitio.

Arteaga (1988), encontró que *P. patula* en la región de Chignahuapan-Zacatlan, Puebla, México, logra su óptimo desarrollo en la exposición noreste y un menor desarrollo en las exposiciones sur.

Este autor también encontró que pendientes hasta de 25 %, tienen un efecto positivo sobre el crecimiento en altura de esa especie, a partir de ahí empieza a tener un efecto curvilíneo negativo.

Stiff *et al.* (1991) encontraron que a medida que aumenta la pendiente, menor es la productividad de *P. oocarpa* en las tierras altas del centro de Honduras. Esto posiblemente se deba a que normalmente a mayor pendiente la calidad y cantidad de suelo disponible para el crecimiento es menor.

4.7.4 Factores edáficos

Diversos estudios relacionados con la calidad de sitio de bosques pinares, coinciden en señalar que los factores asociados con el drenaje del suelo, son los que más influyen en el crecimiento y desarrollo de los pinos.

Wolffsohn (1982) señala que, raramente se encuentran pinos naturales creciendo bien, en suelos con capa impermeable dentro de los primeros cien centímetros de profundidad y los pinos plantados en tales sitios crecen lentamente y son más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades. Este autor señala además que, la profundidad hasta un horizonte moteado o a un horizonte impermeable son probablemente los factores más críticos en la productividad de *P. caribaea*.

Ortega (1986), encontró que las diferencias entre las mejores y peores clases de sitio en rodales jóvenes de *P. caribaea* var. *hondurensis* en Turrialba, Costa Rica, podían atribuirse a diferencias en las condiciones de drenaje. Esta conclusión también fue señalado por Isolan (1972).

Stiff *et al.* (1991) señalan que, las áreas planas y ligeramente cóncavas pobremente drenadas no son adecuadas para el crecimiento de *P. oocarpa*, en las tierras altas del centro de Honduras.

Chávez y Gómez (1985) en el Cerro de la Cruz, Michoacan, encontraron que existía una relación clara y directa del buen desarrollo de la masa con el aumento del tamaño de la partícula del suelo, posiblemente debido a la necesidad de aireación y al tamaño del poro para el crecimiento de las raíces.

Francke (1988) encontró que la basicidad del pH del suelo y las texturas arcillosas influyen negativamente sobre el índice de sitio de *Pinus radiata*.

Además de los factores asociados al drenaje, otra característica edáfica importante que influye sobre la productividad de los pinos, es la profundidad del suelo. Wolffsohn (1982) indica que para el caso de los pinos, la profundidad de suelo disponible a las raíces, es más importante que

la fertilidad y éstos pueden crecer bien en suelos con limitaciones de nitrógeno y fósforo.

Zamudio y Fierros (1994), señalan que en varios estudios donde relacionan variables edáficas y la calidad de sitio para *P. caribaea*, se han encontrado relaciones negativas entre el contenido de nitrógeno u otros nutrientes y la calidad del sitio, lo cual posiblemente se deba a las relaciones complejas que se dan entre las propiedades químicas del suelo. Para el caso específico del nitrógeno, estos autores atribuyen esa relación, al hecho que la mayoría del nitrógeno total está fijado como nitrógeno orgánico en el humus, por lo que la relación entre el nitrógeno y el crecimiento de los árboles podría estar enmascarada.

5 . METODOLOGIA

5.1 Descripción general del área de estudio

5.1.1 Ubicación

La investigación se llevó a cabo en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM), Guatemala. La RBSM está ubicada en la región nororiental del país (Figura 1), comprende una extensión de 236 300 hectáreas, y ocupa parte de cinco departamentos; siendo éstos: Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Izabal y Zacapa (Defensores de la Naturaleza 1992).

Con fines de conservación, la RBSM está dividida en cuatro zonas de manejo: zona núcleo (102 800 ha), zona de recuperación (4 200 ha), zona de uso múltiple (37 000 ha) y zona de amortiguamiento (92 300 ha) (Figura 1).

Con fines administrativos la RBSM se divide además en tres distritos: Chilascó, Motagua y Polochic. La investigación se realizó en la zona de amortiguamiento dentro del distrito Motagua.

5.1.2 Geología y Fisiografía

Los terrenos de la Sierra de las Minas son parte de dos provincias fisiográficas: Las Tierras Altas Sedimentarias y las Tierras Altas Cristalinas (Villar 1993). La zona donde se realizó el estudio, se ubica principalmente dentro de la Provincia fisiográfica Tierras Altas Cristalinas.

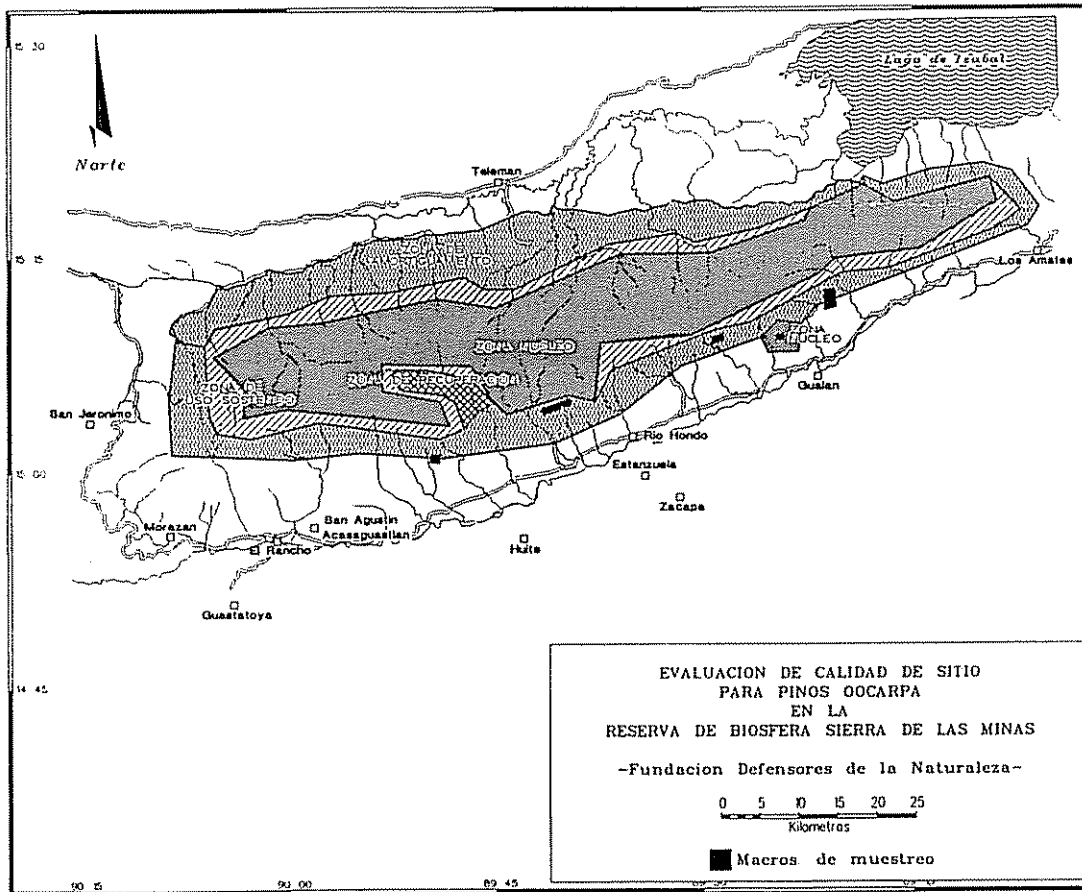
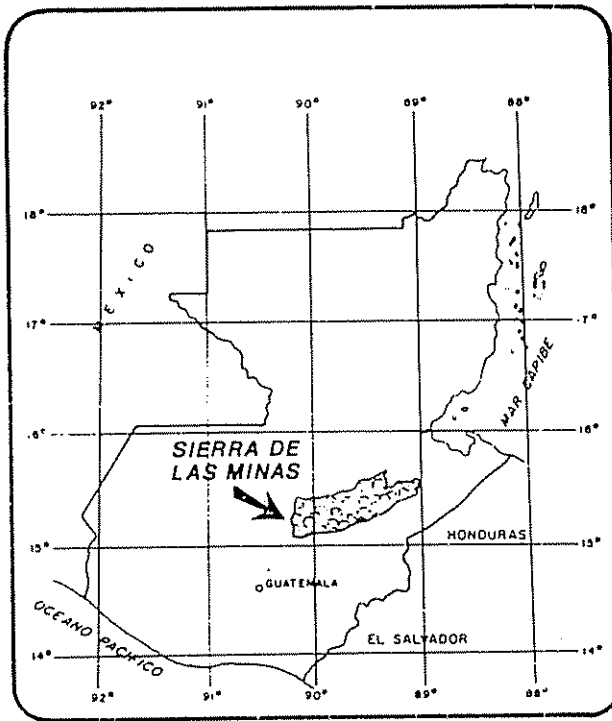


Figura 1. Ubicación de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas y de los macrositios de muestreo.

La cordillera de la Sierra de las Minas, se formó por el levantamiento de una gruesa secuencia de basamento, con algunas rocas de anfibolitas y mármoles (Defensores de la Naturaleza 1992).

Orográficamente corresponde al denominado "Sistema Chuacus" y tiene como carácter general, estar formada principalmente por rocas metamórficas y sedimentos del Paleozoico, batolitos, graníticos, rocas ultramáficas y en menor grado rocas sedimentarias del mesozoico (Villar 1993).

Según el estudio de suelos de Simmons, Tarano y Pinto (1959), los suelos de la zona donde se realizó el estudio, son en su mayoría derivados de serpentina, esquisto, y granito.

5.1.3 Suelos

La información sobre los suelos de la Sierra de las Minas es escasa, y constituye una limitante en la realización de estudios de calidad de sitio.

En los sitios de muestreo se constató que el material parental está constituido principalmente por rocas metamórficas tales como: mármol, serpentina, gneis y esquisto micaceos.

En general, la profundidad de esos suelos varía desde los muy superficiales (menos de 25 cm) hasta los suelos profundos (mayores de 100 cm), y una característica común en todos los sitios de muestreo fue la presencia de pedregosidad superficial.

5.1.4 Elevación y topografía

El rango altitudinal que cubre la región delimitada como zona de amortiguamiento donde se realizó el estudio, varía desde los 500 msnm hasta los 2 500 msnm. Sin embargo, el ámbito altitudinal cubierto por los sitios muestreados varió desde los 780 msnm hasta los 1 772 msnm.

En relación a la topografía, según los mapas topográficos escala 1: 50 000, predominan las pendientes mayores a 30%, y la orientación de esas pendientes es principalmente hacia el sur.

La mayoría de los sitios muestreados, se encuentran entre un rango de pendientes de 25 a 50 por ciento; es poco común encontrar áreas con bosque en pendientes inferiores al 10 % y por el contrario son muy frecuentes las áreas con pendientes superiores al 50 %.

5.1.5 Clima y zonas de vida

La información climática para la zona de estudio, es escasa, y sólo fue posible obtener datos climáticos generales. Según éstos la precipitación total varía desde los 700 mm hasta más de 2 000 mm. La biotemperatura media anual fluctúa entre 19°C y 24°C (Nuñez 1992).

La variación climática a lo largo de la zona de estudio (desplazamiento este-oeste) no es muy marcada pero sí existen diferencias evidentes en dirección norte-sur debido a cambios altitudinales.

En la zona de amortiguamiento de la RBSM, es posible identificar cinco zonas de vida: Monte ~~espinoso~~-Subtropical, Bosque seco Subtropical, Bosque húmedo Subtropical cálido, Bosque muy

húmedo Subtropical y Bosque pluvial montano bajo (Nuñez 1992). *P. oocarpa* generalmente se le encuentra en las zonas de vida Bosque húmedo Subtropical cálido y Bosque seco Subtropical.

5.1.6 Vegetación

En la zona de amortiguamiento y uso múltiple de la RBSM, el estrato arbóreo está dominado por bosques de coníferas, principalmente del género *Pinus*, entre las que dominan: *P. oocarpa*, *P. maximinoii*, *P. pseudostrobus*, *P. caribaea* y *P. ayacahuite*. Existen además, rodales mixtos de *Pinus sp* y *Quercus sp*. (Nuñez 1993). Este autor señala que, muchas áreas forestales principalmente a los alrededores de comunidades, están dominadas por bosques secundarios de especies latifoliadas.

Durante el desarrollo del trabajo de campo, se observó que la dominancia del género *Pinus* está en función del gradiente altitudinal. Específicamente *P. oocarpa* se le encontró en forma aislada a partir de los 500 a 600 msnm mezclado con algunas especies de *Quercus*. Los mejores rodales se encontraron entre los 900 y 1300 msnm, donde esta especie forma rodales puros.

Además de los *Quercus*, otras especies arbóreas que aparecen aisladamente en algunos sitios formando rodales mixtos con *P. oocarpa* son: *Liquidambar styraciflua*, *Byrsonima crassifolia* y *Psidium guajava*.

La gradiente altitudinal en el que aparecen las diferentes especies de pinos varía entre los sitios de muestreo. Se observó que en el sitio 1 (San Lorenzo Marmol), a partir de los 1 400 msnm aparece en forma aislada *P. maximinoii*, que luego forma rodales mixtos con *P. patula* subespecie *tecunumanii* a partir de los 1 750 msnm; mientras que en los sitios 3 (Mal Paso) y 4 (Moran)

esta dos especies fueron observadas formando rodales mixtos con *P. oocarpa* a partir de los 1 200 msnm.

5.2 Diseño del muestreo para la recolección de información

5.2.1 Identificación y selección de los sitios de muestreo

El criterio inicial fue considerar sólo aquellas áreas con rodales relativamente bien conservados y dominados por *Pinus oocarpa*, que no mostraran evidencia de sobrepastoreo, incendios frecuentes o explotaciones forestales recientes (extracción de madera, leña, resina). Estos criterios tenían como objetivo reducir al máximo toda fuente de variación que no sea debida al sitio. Sin embargo, todos los rodales encontrados mostraron evidencia de incendios y de pastoreo extensivo, por lo que no se guardó ninguna restricción con respecto a esos dos factores externos. Aparentemente son parte de las condiciones ambientales con los que convive la especie en esta región.

Los sitios de muestreo se preseleccionaron con base en la presencia de la especie de interés, ubicándolos sobre mapas topográficos escala 1:50 000 con la ayuda de fotografías aéreas falso color escala 1:24 000. Posteriormente se eligieron los sitios definitivos durante las visitas de campo, considerando no solo la presencia de la especie, sino también la calidad de los rodales, la anuencia de los propietarios de los terrenos y la variabilidad ambiental.

5.2.2 Método de muestreo

Se realizó un muestreo selectivo, seleccionando a juicio las parcelas directamente en el campo. Durante la selección se trató de cubrir toda la variabilidad posible entre y dentro los sitios seleccionados, en función de las variables a evaluar.

5.2.3 Tamaño y forma de parcela

Para escoger el tamaño de parcela se siguieron los lineamientos dados por Castaños (1962). Este autor recomienda que el tamaño de las parcelas debe permitir el muestreo de un número adecuado de árboles (10 a 15 árboles) y también asegurar que los valores de las propiedades de suelo y topografía sean lo más uniformes posible, a través de toda el área de la parcela. Se buscó reducir al máximo la variación dentro de la parcela y aumentarla entre parcelas. En parcelas muy grandes podría darse el peligro que las condiciones locales (dentro de la parcela) varíen considerablemente (Campos 1989c, Herrera 1996).

Además, se consideraron los criterios utilizados en otros estudios similares (Cochran 1979; Arteaga 1988; Monserud 1988), y aspectos de tiempo y costos, con base en lo cual se decidió utilizar parcelas circulares de 500 metros cuadrados.

El tamaño y forma de parcela elegido, resultó ser efectivo en la mayoría de los sitios muestreados, sin embargo, en sitios donde la densidad natural (árboles por hectárea) es muy baja (menor de 150 árboles/ha) presenta el problema de que se dispone de muy pocos árboles para determinar la altura dominante de la parcela (promedio de los 5 árboles más altos por parcela).

La forma de la parcela resultó ser muy práctica en este tipo de bosque, debido a que la mayoría de los sitios muestreados

presentaron escaso sotobosque, en algunos casos por causa de incendios y en otros por la época en que se realizó el muestreo (época seca), lo cual facilitó el trazo de este tipo de parcela.

5.2.4 Número de parcelas y distribución por sitio

Se instalaron un total de 38 parcelas en cinco macrositios. La distribución de esas parcelas por macrositio es presentada en el Cuadro 1. En este caso se consideró como macrositio áreas relativamente grandes (mayor de 500 has) que involucran la existencia de más de una finca y/o la presencia de comunidades de pobladores locales.

Por razones de ubicación geográfica (y vías de acceso), se agruparon los sitios de muestreo en cinco macrositios (Figura 1). En el caso de los macrositios uno y tres, se subdividen en dos, porque presentan marcadas diferencias altitudinales, topográficas y edáficas.

El número de parcelas establecidas en cada macrositio, estuvo en función de la variación observada, principalmente en relación a la topografía, la profundidad del suelo, la pedregosidad superficial y la presencia de rodales relativamente bien conservados y con dominancia de *P. oocarpa*. Además de los factores anteriores, el número de parcelas estuvo condicionado por el tiempo y los recursos económicos disponibles para realizar el estudio.

Cuadro 1. Ubicación y distribución de 38 parcelas temporales de muestreo de *P. oocarpa*, en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala.

Sitio	Ubicación	No. parcelas	Rango altitudinal (msnm)
1A	San Lorenzo Mármol (Fca. Guatemarmol)	7	1556-1772
1B	San Lorenzo Mármol (Sta. Rosalía-Naranjo)	5	1065-1521
2	El Chico (Fcas. Teocinte, Y La esperanza)	6	808-1190
3A	Mal Paso (Fca. las Victorias)	4	990-1180
3B	Mal Paso (Fcas. Sta. Rosalía y las Limas)	7	905-1055
4	Cerro las Cañas	5	780-1320
5	Comunidad de Morán	4	980-1300
TOTAL		38	Parcelas

Dentro de cada macrositio se trató de cubrir toda la variabilidad posible; sin embargo, un factor determinante fue la anuencia de los propietarios de los bosques para autorizar el establecimiento de las parcelas de muestreo en sus terrenos, principalmente por el hecho que en cada parcela se tumbaron dos árboles para los análisis fustales.

5.2.5 Selección de árboles muestra para análisis fustal

Los árboles para el análisis fustal se seleccionaron con base en los lineamientos dados para este tipo de estudios por: Castaños 2(1962); Cochran (1979); Monserud (1987) y Stiff *et al.* (1991). Esos criterios implicaron muestrear solo aquellos árboles que reunieron las siguientes características:

- ◆ árboles del estrato dominante o codominante; copas con buena iluminación;
- ◆ sin evidencias de severa competencia en el pasado o de estrés (evidenciado por estrechamiento de anillos seguido de un ensanchamiento);
- ◆ árboles sanos, no infectados con enfermedades y que no tengan señales visibles de defoliación por insectos;
- ◆ sin indicios de resinación u otro daño en el fuste;
- ◆ árboles bien conformados con respecto al fuste (fuste recto sin bifurcaciones) y sin daños en la copa;
- ◆ con un porcentaje de copa viva mayor a 40%.

Una proporción menor al 40% de la copa viva, puede indicar un crecimiento lento de altura, producto de una intensa competencia entre árboles (Dolph 1987). Todos los árboles analizados presentaron un porcentaje de copa viva mayor al 40%.

Las consideraciones anteriores se tomaron en cuenta, para asegurar que los árboles muestreados son una expresión del máximo potencial del sitio y no de situaciones ajenas a éste (manejo, plagas y enfermedades, etc). Estos criterios nos permiten asegurar

que los árboles muestreados son buenos indicadores de la capacidad productiva innata de los sitios.

Dos de los cinco árboles dominantes en cada parcela, se seleccionaron para el análisis fustal, para explicar la variabilidad en el crecimiento en altura en función de la edad, y para desarrollar a partir de esos datos ecuaciones de índice de sitio y la construcción de las curvas de índice de sitio. Un total de 76 árboles fueron tumbados para efectuar el análisis fustal, de los que finalmente se utilizaron 75.

5.3 Recopilación de la información de campo

La toma de datos de campo se inició en abril y se finalizó en julio de 1996.

5.3.1 Metodología para el análisis fustal

Para la realización del análisis fustal, se siguieron los lineamientos dados para este tipo de estudios por Klepac (1976), y Anuchin (1970).

Cada árbol seleccionado fue tumbado a 0,30 m de la superficie del terreno y luego dividido en secciones. En todos los árboles, la primera sección se obtuvo a 0,30 m y la segunda a 1,30 m. A partir de esta altura, el fuste se troceó en secciones de longitud de 2,5, 2,0 y 1,0 m dependiendo del interés comercial del dueño de los árboles.

El conteo y medición de los anillos de crecimiento se realizó directamente en el campo en la mayoría de los casos. Sin embargo por razones prácticas (disponibilidad de tiempo), fue necesario transportar algunas secciones (principalmente de la parte terminal del fuste) para posteriores conteos de anillos. En esos casos cada sección o disco se identificó plenamente (por la cara inferior) con el código de la parcela, el número del árbol y la altura a la que se cortó.

A cada una de las secciones transversales (discos), se les marcó en la cara superior cuatro radios partiendo de la médula hacia el cambium.

En los radios de cada disco se contó el número de anillos, separándolos por grupos de cinco, esto permitió verificar que en los cuatro radios existiera el mismo número de anillos y poder detectar falsos anillos de crecimiento.

Además, con una regla graduada y con una precisión al milímetro, se midió la longitud de cada grupo de cinco anillos a lo largo de los radios desde la médula hasta el borde del disco, incluyendo la corteza. Esto permitió obtener al final un promedio del espesor de los anillos, generando información que podrá ser utilizada en análisis posteriores de crecimiento e incremento. La información fue registrada en formularios preparados para el efecto.

Los datos del conteo de anillos en cada sección se convirtieron a edades arriba de la altura del tocón (0,30 m) y arriba de la altura del pecho respectivamente, substrayendo el número de anillos contados para cada sección del número de anillos contados a cada una de esta alturas. Esto permitió construir los pares de datos edad-altura.

5.3.2 Evaluación de variables topográficas

a) Exposición de la pendiente

En cada parcela se midió con una brújula el azimut a partir del norte magnético, siguiendo la dirección de la longitud de la pendiente dominante.

b) Posición en la pendiente

En relación a la posición de la pendiente se consideraron básicamente tres posiciones:

Posición	Código
parte alta (loma)	1
parte media (ladera)	2
parte baja (cañada)	3

Además, se consideró el contorno o forma de la pendiente

Clase	Código
convexo	1
recto	2
cóncavo	3

Los códigos asignados tanto a la posición como a la forma de la pendiente están en función de las respuestas que se espera obtener y van de lo menos favorable (código 1) a las mejores condiciones (código 3). Esta asignación de clases facilitó la interpretación de los análisis estadísticos posteriores.

Tanto la posición como la forma o perfil de la pendiente se estimaron por observaciones visuales.

c) Porcentaje de pendiente

En cada parcela se midió el promedio del porcentaje de la pendiente, utilizándose un clinómetro. No se consideraron áreas con pendientes superiores a 70 por ciento, debido a que normalmente estas áreas tienen un pobre potencial para manejo forestal, son difíciles de muestrear, y además, la legislación forestal de Guatemala restringe las actividades de manejo forestal en terrenos con pendientes superiores al 70 por ciento.

5.3.3 Evaluación de variables edáficas

Para evaluar el efecto de los factores edáficos, se levantó una subparcela de 10 m^2 en cada uno de los cinco árboles dominantes dentro de cada parcela. Esta subparcela se trazo en forma cuadrada con 3.33 m por lado, con el árbol dominante hacia el centro de la parcela. Esto permitio dividir la subparcela en cuatro cuadrantes, permitiendo un mejor criterio para la evaluación de variables estimadas por observación visual como la erosión y la pedregosidad superficial, reduciendo de esta manera la subjetividad en su estimación.

5.3.3.1 Evaluación de la fertilidad del suelo

El procedimiento para la toma de muestras para determinar el contenido de nutrientes del suelo consistió en:

- a) Se fijaron dos profundidades de muestreo: de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm.

Según Campos (1989b), la técnica ideal de muestreo de suelos para este tipo de estudios, deberá representar la porción del suelo

donde se de el mayor desarrollo de raíces y donde ocurra la mayor absorción de nutrimentos y agua.

En este caso no se conocía la profundidad de concentración de raíces de *P. oocarpa* en la zona del estudio, por lo tanto el criterio inicial se basó en lo reportado por Page (1976). Este autor indica que, para el caso de las coníferas el desarrollo de raíces dentro del perfil es mínimo a profundidades mayores a los 30 cm. Este criterio se corroboró por observación visual de algunos perfiles en los sitios de muestreo, especialmente en aquellos suelos poco profundos.

b) En cada parcela se tomaron cinco submuestras con barreno para ambas profundidades de suelo, una muestra en cada una de las cinco subparcelas de 10 m².

c) Las cinco submuestras se mezclaron y homogeneizaron obteniéndose una muestra representativa de cada profundidad de muestreo, la cual se envió al laboratorio para su análisis.

5.3.3.2 Evaluación de otras variables del suelo

También se evaluó la profundidad efectiva, la pedregosidad superficial y la erosión.

La profundidad efectiva se consideró como la profundidad del suelo hasta el material original o una capa cementada que impidiera la penetración de las raíces. Esta se evaluó por medio de barrenamientos en las cinco subparcelas de muestreo y el valor promedio se asignó a la parcela. En los casos donde se encontró roca, se barrenó nuevamente cerca del primer agujero para ver si realmente se trataba de una capa limitante o simplemente de una roca pequeña.

La pedregosidad superficial se estimó en función del porcentaje de superficie cubierta por rocas en cada una de la cinco subparcelas, obteniendo un valor promedio de las cinco subparcelas.

Para efecto de análisis de los datos, la pedregosidad se agrupó de acuerdo a la siguiente codificación (Ugalde 1995)

código	clase	Superficie cubierta por piedras (%)
1	pocas	1-10
2	media	10-30
3	alta	> 30

La erosión superficial se estimó en función de la presencia o no de evidencias de erosión en cada una de las subparcelas de muestreo. Se utilizó la siguiente codificación (Campos 1989c):

grado de erosión	código	criterios
leve o nula	1	no evidente a simple vista
moderada	2	evidencia de pedestales o suelo descubierto
severa	3	evidencia de pedestales, surcos y/o zanjas de escorrentia.

5.3.4 Muestreo foliar

La toma de muestras de ascúculas se realizó de mayo a julio de 1996. En cada parcela de muestreo se recolectaron muestras de ascúculas de la parte más alta de la copa. Se trató de tomar muestra en los cuatro planos de la copa en dos de los cinco árboles dominantes. En la mayoría de los casos se utilizó los árboles tumbados para el análisis fustal.

5.3.5 Evaluación de variables del rodal

Se midió el diámetro con cinta diamétrica a la altura de 1,30 m (dap) sobre el nivel del suelo de todos los árboles de la parcela con un dap igual o mayor a 10 cm.

Además, se midió la altura total con hipsómetro para todos los árboles de la parcela con un dap igual o mayor de 10 cm, y se registró en metros desde la base hasta el extremo superior de la copa del árbol.

A partir de estos datos se estimó la "altura dominante" como el promedio de las alturas de los 100 árboles más altos por hectárea (Vincent 1975); considerándose en este caso los cinco árboles más altos por parcela.

El área basal se estimó por parcela mediante la siguiente fórmula:

$$G = \sum d_i^2 * 0.7854 \quad [5.1]$$

donde: G= área basal/parcela (m²)

d_i= dap de cada árbol individual de la parcela

Se calculó el volumen de todos los árboles de la parcela, utilizando la fórmula de volumen [5.2] para árboles individuales desarrollada para *P. oocarpa* por Pérez, *et al.* (1990).

$$V = 0,02525137 + 0,00002840 (d^2 h) \quad [5.2]$$

donde:

V = volumen con corteza del árbol individual en m^3
 d^2 = diámetro con corteza (en cm), a la altura del pecho
 h = Altura en m

Se determinó la edad para los cinco árboles dominantes por medio de conteo de anillos en tarugos obtenidos de barrenamientos a la altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo.

En los dos árboles muestreados destructivamente, la edad para diferentes alturas se determinó por medio del conteo de anillos de cada una de las secciones transversales obtenidas en el troceo de los árboles tumbados, según el procedimiento descrito en el análisis fustal.

Se midieron las alturas intermedias en los árboles tumbados para el análisis fustal. Estas corresponden a las longitudes de las secciones de los fustes troceados para el análisis fustal.

5.3.6 Métodos de análisis de laboratorio

Los análisis físico-químicos de las muestras de suelo y de tejido vegetal fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Los análisis efectuados y los métodos empleados se resumen en el anexo 7.

5.5 Análisis de la información

5.5.1 Ordenación de la información de campo

Para facilitar posteriores análisis de los datos de campo, se crearon las siguientes bases de datos relacionales en la hoja electrónica Quattro-pro:

- ♦ sitio.dat: contiene la información de las variables generales del sitio (variables topográficas, ubicación, otros factores);
- ♦ suelo.dat. contiene la información relacionada con el suelo para las dos profundidades de muestreo;
- ♦ folia.dat. contiene los resultados de los análisis foliares;
- ♦ rodal.dat: contiene la información de las variables dasométricas del rodal.

Estas bases de datos están relacionadas entre si por el código de sitio y de parcela.

5.5.2 Construcción y selección del modelo para estimar el índice de sitio

Para la construcción y selección del modelo que mejor representa el crecimiento en altura de *P. oocarpa*, se siguió el siguiente procedimiento:

5.5.2.1 Graficación de datos edad-altura

Se graficaron los pares de datos edad-altura obtenidos de los 75 árboles a los que se les realizó el análisis fustal. El diagrama de dispersión de los datos permitió observar que no existan valores extremos o puntos de influencia, que sesguen el ajuste de algún modelo matemático en particular y la depuración de datos.

La tendencia en la dispersión permitió definir preliminarmente los tipos de modelos que pueden ajustar mejor matemáticamente la distribución de los datos.

5.5.2.2 Modelos probados

Con los pares de datos edad-altura de los árboles muestreados destructivamente, se probó la bondad de ajuste del modelo matemático de Schumacher[5.3], y de Chapman-Richards [5.6] descrito por Clutter *et al.* (1983), considerando la edad total y la edad a partir de la altura del pecho.

a) Modelo de Schumacher

$$\text{Ln } H_d = a + b/E^k \quad [5.3]$$

donde: Ln Hd = logaritmo natural de la altura dominante

a = coeficiente de intercepto común

b = coeficiente de la pendiente común

E = edad base (años)

k = parámetro de la ecuación de Schumacher

De la ecuación [5.3], se pueden derivar dos modelos para estimar el índice de sitio: el modelo de intercepto común [5.4] que se obtiene manteniendo constante el coeficiente del intercepto "a", con el cual se pueden producir curvas polimórficas, y, el modelo de pendiente común [5.5] que se obtiene al mantener constante el coeficiente "b" de la pendiente, este último da lugar a la construcción de curvas anamórficas.

♦ ecuación para producir curvas con intercepto común:

$$\text{Ln}(\text{IS}) = \text{ln Hdom} - b(1/E_b^k - 1/E_i^k) \quad [5.4]$$

♦ ecuación para producir curvas de pendiente común

$$\text{Ln}(\text{IS}) = a + (\text{ln Hdom} - a) * (E_i/E_b)^k \quad [5.5]$$

donde:

Ln(IS) = logaritmo natural del índice de sitio

Hdom = altura dominante (m)

E_i = edad de la medición (a partir del dap)

E_b = edad base (años)

a, b, k = parámetros de la ecuación general

b) Modelo de Chapman-Richards

$$H = a(1 - e^{-b \cdot E})^c \quad [5.6]$$

donde:

H = altura del árbol (m)

E = edad del árbol (años)

e = base del logaritmo natural

a, b y c = parámetros de la ecuación de Chapman-Richards
(a ser estimados por regresión)

Este modelo también permite obtener curva de intercepto común y curvas de pendiente común, los cuales se presentan en el Anexo 2.

Los parámetros del modelo de Schumacher se obtuvieron utilizando el Programa SINDE³ que forma parte del Palmer's Statistical Package³. Este Programa calcula índices de sitio para las dos modalidades del modelo de Schumacher (intercepto común y pendiente común), haciendo los cálculos en forma interactiva en seis etapas. En las primeras tres etapas calcula los coeficientes a, b y k de la función de Schumacher.

En la cuarta etapa calcula los coeficientes de regresión, basados en los coeficientes de intercepto común, para los índices de sitio dados por el usuario a la edad índice seleccionada. En la etapa cinco calcula los índices de sitio basados en un intercepto y pendientes comunes, para cada par de edad/altura dominante de los datos originales, y, en la sexta etapa gráfica las curvas de índices de sitio.

De esta forma se obtuvo los índices de sitio para cada par de datos para los modelos de intercepto común y pendiente común del modelo de Schumacher.

Para obtener los parámetros de la ecuación de Chapman-Richards se utilizó el procedimiento PROC NLIN del SAS/STAT (1993).

5.5.2.3 Selección del modelo de mejor ajuste

Primeramente se seleccionó el modelo general, con base a los estimadores estadísticos obtenidos del análisis de varianza, y el análisis gráfico de los residuales (Draper y Smith 1981).

³=Palmer H. Tropical Forestry & Computing Ltd. 1991
Programa SINDE³ (cálculo interactivo de índices de sitio)

Los estimadores usados son:

- ◆ coeficiente de determinación " r^2 " y el r^2 ajustado;
- ◆ la suma de cuadrados;
- ◆ El cuadrado medio del error;
- ◆ El grado de significancia de la regresión obtenido con la prueba de F.

Con el modelo seleccionado se obtuvo el índice de cada parcela, utilizando una edad base de 25 años.

Se escogió esa edad porque permite incluir en el análisis, rodales relativamente jóvenes de 23 a 26 años que fueron incluidos en el muestreo. Estos representan a muchos de los rodales que han surgido producto de la regeneración natural en áreas donde se realizaron extracciones forestales en el pasado, y que en su mayoría corresponden a los mejores sitios. Además, es una edad cercana a los turnos de rotación para esa especie, los cuales dependiendo el tipo de producto que se pretenda extraer y de la calidad del sitio y del rodal, podría estar entre los 30 a 40 años (obtención de madera para aserrío).

5.5.2.4 Selección entre el modelo de intercepto común y pendiente común.

Para seleccionar entre el modelo de intercepto común o pendiente común, se realizaron dos tipos de validación: con los mismos datos utilizados para generar el modelo (verificación); y con datos independientes.

Los criterios aplicados para la validación de los modelos se fundamentan en la metodología propuesta por Campos (1989c), quien señala que las discrepancias entre el índice de sitio promedio de una parcela y cualquier medición particular en la misma parcela,

estimado del correspondiente error no observado E_i .

De acuerdo con lo cual, los residuales pueden ser estimados con la fórmula [5.7]

$$e_i = IS - IS_i \quad [5.7]$$

donde: IS = índice de sitio promedio de la parcela
 IS_i = índice de sitio de la medición a la edad i en la misma parcela.

Según este autor, la suma de cuadrados de los residuales ($\sum e_i^2$) puede ser utilizada como una buena medida del ajuste del modelo, donde los residuales (e_i) son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

Para estimar el índice de sitio promedio de la parcela, se procedió primero a estimar un índice de sitio promedio para cada uno de los árboles utilizados para el análisis fustal. Estos dos valores junto con los otros tres árboles dominantes de la parcela conformaron el índice de sitio promedio de la parcela.

Si el modelo fue correcto, el índice de sitio promedio de la parcela deberá representar un buen estimador del índice de sitio de esa parcela (Campos 1989c). Una de las ventajas de este procedimiento es que permite realizar el análisis gráfico de los residuales, para evaluar las desviaciones del modelo de los supuestos probados en el análisis de regresión (Drapper y Smith 1981)

Los dos criterios utilizados para escoger entre ambos modelos fueron: la suma de cuadrados de los residuales, (suma de cuadrados del error), que nos indica qué modelo presenta más desvíos en el índice de sitio estimado en relación al índice de sitio promedio (Campos 1989c), y el análisis gráfico de los residuales, los cuales

permiten observar si se cumplen los supuestos del modelo de regresión (Draper y Smith 1981; Vanclay 1994).

Se escogió el modelo con la menor suma de cuadrados de los residuales, y que no presentó ningún sesgo sistemático hacia la edad del rodal o la calidad del sitio.

Cualquier sesgo sistemático hacia el rango de edades incluidas en la computación de los datos, invalida el concepto de índice de sitio promedio (Campos 1989c).

Para la validación independiente se utilizaron pares de datos edad-altura de árboles barrenados a la altura del pecho en rodales cercanos a los sitios de muestreo.

5.5.3 Análisis de la variación edáfica y topográfica y su efecto sobre la productividad de *P. oocarpa*.

Para el análisis de los factores de sitio evaluados, se utilizó la información contenida en las bases de datos sitio.dat, suelo.dat y folia.dat (sección 5.5.1).

Un total de 37 variables de sitio, fueron finalmente incluidas para análisis subsecuentes. Las variables edáficas de cada profundidad de muestreo se registraron como dos variables diferentes de sitio.

Se obtuvieron además, las estadísticas descriptivas de cada una de las variables incluidas en las bases de datos (valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación).

Primeramente se hicieron gráficos bivariados relacionando el

índice de sitio (variable de respuesta) con cada una de las variables evaluadas, a fin de observar la tendencia mostrada en los diagramas de dispersión. Estos gráficos son útiles porque no solo permiten evaluar la distribución y asociación entre las variables sino también ayudan a detectar posibles errores en los datos (Campos 1989c).

El índice de sitio se correlacionó mediante una matriz de correlación con cada una de las 37 variables incluidas en los análisis, para determinar cuales de esas variables presenta una mejor asociación con la productividad de la especie de interés (mayor valor del coeficiente de correlación de Pearson), lo cual ayudó en la selección de variables a incluir en los modelos de calidad de sitio que se generaron.

Para detectar y evitar problemas de multicolinealidad entre las variables edáficas y/o topográficas evaluadas, se utilizó el procedimiento desarrollado por Campos (1989c) y utilizado por Herrera (1996), el cual consiste en los siguientes pasos:

- ♦ construcción de una matriz de correlación utilizando las variables edáficas y topográficas. Con esta matriz se analizó la estructura de la dependencia entre las variables ambientales predictivas. Para esto los coeficientes de correlación se clasificaron en los siguientes rangos: $r \geq 0.5$; $0.5 \geq r \geq 0.4$; $0.4 \geq r \geq 0.3$. Este análisis permitió detectar qué variables estaban más fuertemente correlacionadas y que podían dar problemas de colinealidad;
- ♦ evaluación del grado de colinealidad entre las variables ambientales. Fue necesario la determinación del factor de inflación de la varianza (FIV), que se determina para la inversa de la matriz de correlación de las variables evaluadas.

- ♦ eliminación de variables ambientales, considerando el grado de colinealidad y criterios prácticos para su medición en campo.

Una vez seleccionadas las variables que presentaron coeficientes de correlación estadísticamente significativos ($P \leq 0,05$) con el índice de sitio, y que no mostraron problemas de colinealidad, se procedió a ajustar los modelos de regresión.

Para el ajuste de los modelos se utilizó el PROC REG del SAS/STAT (1993), aplicando el método de regresión hacia adelante (FORWARD), con lo cual se obtuvo los modelos definitivos. Para evaluar los supuestos en que se basan los modelos de regresión múltiple, se utilizaron las opciones brindadas por el PROC GLM del SAS/STAT (1993).

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Caracterización de la variación en la productividad del sitio

6.1.1 Construcción de modelos de índice de sitio

En la Figura 2 se muestra la evolución de la altura dominante en relación a la edad, de los 75 árboles a los que se les realizó análisis fustal. Nótese que la nube de dispersión de los pares de datos edad-altura, no presenta valores extremos o alejados que pudieran sesgar el ajuste de un modelo matemático.

La concentración de datos (edad-altura), disminuye notablemente a partir de los 50 años, debido a que en el muestreo realizado, fue difícil encontrar rodales relativamente bien conservados con edades superiores a esa edad.

En general los bosques de *P. oocarpa* de la Sierra de las Minas, se sometieron a intensos aprovechamientos forestales en el pasado (hace 20 a 40 años). La mayoría de los mejores rodales que se encontraron en los sitios de muestreo, tienen menos de 25 años de edad y son producto de la regeneración natural en áreas que han quedado desprovistas de vegetación, después de ser sometidas a actividades de extracción maderera. También es común encontrar rodales poco densos con árboles viejos remanentes de extracciones selectivas donde se extrajeron los mejores árboles.

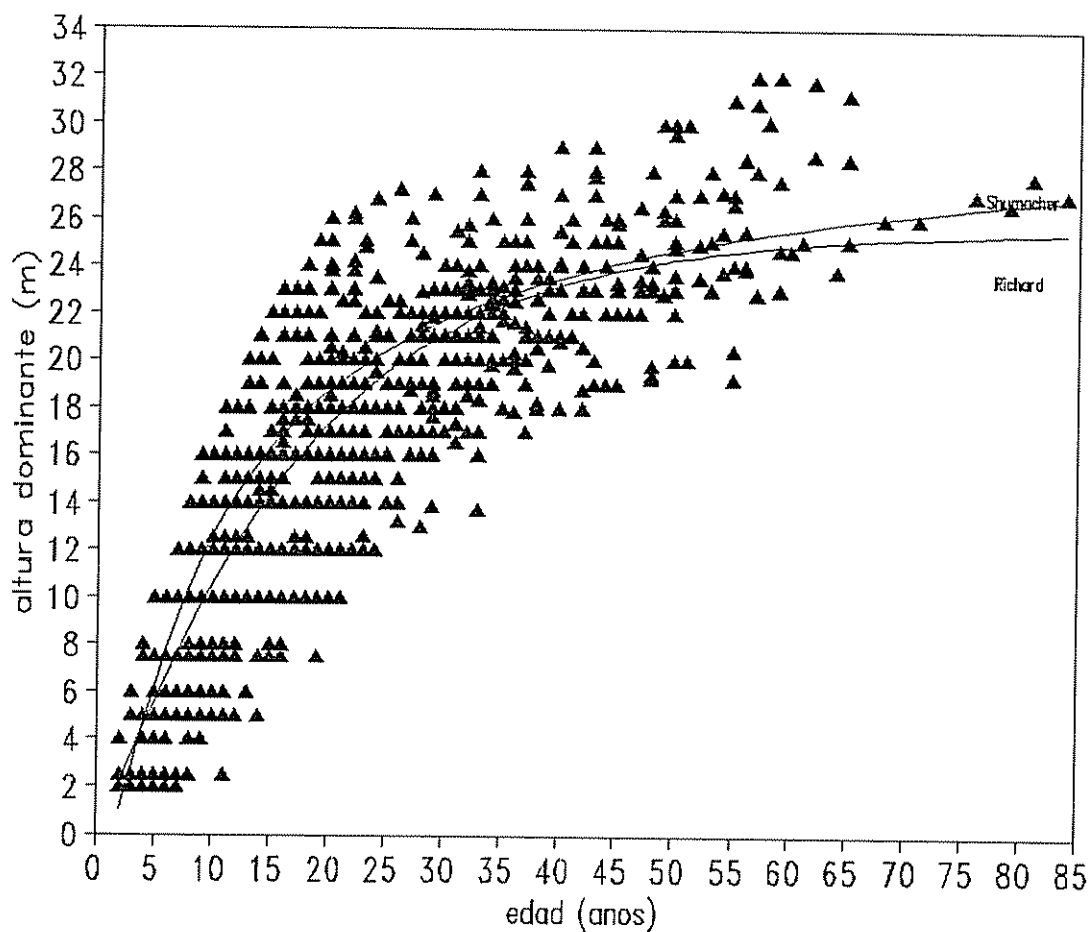


Figura 2. Dispersión de los pares de datos edad-altura y comportamiento de las ecuaciones promedio de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, considerando la edad estimada a la altura del pecho. *P. oocarpa*, RBSM, Guatemala.

La curva promedio de la ecuación de Chapman-Richards [5.6] ajustada a los pares de datos edad-altura, mostró un comportamiento muy similar a la de Schumacher [5.3], Figura 2. Sin embargo, al aplicar los modelos de pendiente común e intercepto común derivados de esa ecuación (Anexo 2), se presentó el problema que el modelo de intercepto común sobreestima exageradamente el índice de sitio en aquellos casos donde, la altura dominante sobrepasa el valor del parámetro "a" (máxima asíntota del crecimiento en altura) y cuando la edad fue considerablemente mayor a la edad base (principalmente después de los 50 años). Por tal razón no fue posible comparar dicho modelo con los otros modelos ajustados.

Debido a ese comportamiento del modelo de Chapman-Richards, se optó por utilizar únicamente el modelo de Schumacher [5.3], considerando la edad total y la edad a partir del dap (edad a 1,30 m). Este modelo ha dado un buen ajuste en estudios realizados con la misma especie en otras regiones (Benavides y Manzanilla 1993, Benavides 1991; Aguilar 1991; Itzep 1995).

Los parámetros de la ecuación promedio para el modelo de Schumacher en ambas modalidades y los estadísticos obtenidos en el análisis de varianza se presentan en los Cuadros 2 y 3.

Los valores de estos parámetros se encuentran dentro de los rangos establecidos por Alder (1980) para la aplicación de ese modelo. Según este autor, el valor del parámetro "a" deberá estar comprendido entre 2 y 7; el parámetro "k" entre 0.2 y 2 y el signo de la pendiente (parámetro "b") deberá ser negativo.

Cuadro 2. Parámetros del modelo de Schumacher considerando la edad total y la edad al dap, para la estimación del índice de sitio de *P. oocarpa*, en la RBSM, Guatemala.

Parámetro	Edad total	Edad al dap
a	3.5348	3.4547
b	-5.1681	-5.9851
k	0.6087	0.8119

Cuadro 3. Estadísticos del análisis de varianza del modelo de Schumacher, considerando la edad total y la edad al dap de *P. oocarpa*, en la RBSM, Guatemala.

Estadísticos	Modelos	
	Shumacher Edad total	Shumacher Edad al dap.
R^2	0.78	0.80
R^2 -ajustado	0.78	0.80
Cuadrado medio del error	0.93	0.88
Valor de F	3571.9**	4179.5**
Coef. de variación (dentro parcelas)	12.0	11.6

** Altamente significativa $P < 0,01$

Los estadísticos obtenidos en el análisis de varianza para las dos modalidades del modelo de Schumacher, son muy similares. El coeficiente de determinación R^2 , el cual mide la proporción de la variación total en relación a la media explicada por la regresión (Draper y Smith 1981), es ligeramente superior al considerar la edad a partir de 1,30m.

En este caso, el R^2 indica el porcentaje de la variación en el crecimiento en altura, que el modelo general explica en función de la edad, sin considerar el efecto de diferencias en la calidad del sitio (Campos 1988b).

El cuadrado medio del error, estimador de la varianza del modelo de regresión, también es menor al considerar la edad a partir de 1,30m, por lo tanto el ajuste de este modelo es mejor.

Los dos modelos presentan estimadores similares; sin embargo, se eligió el modelo que utiliza la edad a partir del dap, para evitar el efecto de la variación presentada por *P. oocarpa* para alcanzar la altura de 1.30 m. Esa variación puede deberse no solo al efecto del sitio sino también a la influencia de factores externos tales como pastoreo, incendios frecuentes, competencia con malezas, etc.

En el análisis de residuales se encontró que, al considerar la edad total los residuos no presentan una distribución normal bien definida. Similares resultados son reportados por Heger (1968) para black spruce (*Picea mariana*), quien encontró que en esa especie la distribución de las alturas cambia durante los primeros años de crecimiento, de una distribución no normal a una distribución normal.

Carmean y Lenthall (1988), encontraron que los residuales revelaron grandes variaciones en la estimación del índice de sitio

en rodales jóvenes de jack pine (*Pinus banksiana* Lamb), aún cuando utilizaron la edad a la altura del pecho como base para determinar el índice de sitio. Se atribuyó este comportamiento a un bajo y errático crecimiento en altura antes que los árboles alcancen la altura del pecho. Campos (1989c) encontró lo mismo para *Eucalyptos camaldulensis*, *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* en Centro América.

En los sitios muestreados, *P. oocarpa* presentó marcadas diferencias en los años requeridos para alcanzar la altura de 1.30 m (Cuadro 4).

Cuadro 4. Variación en la edad requerida para que *P. oocarpa* alcance la altura de 1.30m, en relación al índice de sitio, en la RBSM, Guatemala.

Edad para alcanzar 1.30 m	Frecuencia	Proporción de Parcelas (%)	Índice de Sitio promedio
2	6	8.0	23.5
3	13	17.3	23.0
4	23	30.6	19.2
5	20	26.7	17.3
6	11	14.7	16.2
7	2	2.7	13.5

Los datos obtenidos coinciden con lo reportado por Stiff *et al.* (1991) para los bosques de *P. oocarpa* de Honduras, quienes señalan que el número de años promedio que esa especie necesita

para alcanzar una altura de 1.3 m, es de: dos, tres, cuatro, cinco y seis años para índices de sitio de 25, 20, 15, 10 y 5 metros respectivamente, considerando una edad base de 15 años.

Del Cuadro 4, se deduce que los años requeridos por *P. oocarpa* para alcanzar la altura al dap, presenta una relación inversa con el índice de sitio que va desde los dos años para los mejores sitios, hasta los siete años para los peores sitios.

En los datos del Cuadro 4, se consideró el promedio de los índices de sitio de las parcelas incluidas dentro de cada clase de edad para llegar al dap. Sin embargo, en parcelas individuales se encontró que no todas guardan la misma relación, lo que hace suponer que en algunos sitios factores externos a la calidad del sitio tales como: extracciones forestales selectivas, el sobrepastoreo o los frecuentes incendios, son los que principalmente influyen en el crecimiento inicial de *P. oocarpa*.

Otra consideración importante es que, se asume que todos los árboles tardaron un año para alcanzar 0,30 m (altura donde se efectuó la primer lectura de anillos). Sin embargo, la edad a la cual el árbol alcanza esa altura, también depende no solo de los factores propios del sitio sino que, principalmente de factores externos como los antes mencionados.

Wolffsohn (1984), afirma que el crecimiento inicial de *P. oocarpa* es muy lento debido a que normalmente ocupa suelos poco fértiles. Este autor señala que esta especie en las mejores condiciones pueden sobrepasar los 30 cm en el primer año, pero normalmente tiene entre 5 a 10 cm al final del primer año y generalmente la altura del pecho es alcanzada después de 5 años. Dicho autor sólo hace alusión a la fertilidad del suelo y no menciona el efecto de actividades antropogénicas externas a las características propias del sitio, que son comunes en este tipo de

bosques.

La variación presentada por la especie para alcanzar la altura del pecho (1,30m) y los estadísticos presentados en el Cuadro 2, fundamentan la decisión de considerar que la ecuación de Schumacher utilizando la edad a partir del dap [6.1], explica mejor la variación en el crecimiento en altura dominante en relación a la edad de *P. oocarpa*. Esta ecuación queda de la siguiente manera:

$$\text{Ln} (\text{Hdom}) = 3.4547 - 5.98511 / (\text{Eb}^{0.811934}) \quad [6.1]$$

donde:

$\text{Ln}(\text{Hdom})$ = logaritmo natural de la altura dominante
 Eb = edad base (años)

Los modelos derivados de la ecuación [6.1], para producir curvas anámorficas o curvas polimórficas, quedan de la siguiente manera:

♦ modelo de intercepto común:

$$\text{Ln}(\text{IS}) = \text{ln Hdom} - 5.98511 \left(\frac{1}{\text{E}_b^{0.811934}} - \frac{1}{\text{E}_i^{0.811934}} \right) \quad [6.2]$$

♦ modelo de pendiente común:

$$\text{Ln} (\text{IS}) = 3.4547 + (\text{ln Hdom} - 3.4547) * \left(\frac{\text{E}_i}{\text{E}_b} \right)^{0.811934} \quad [6.3]$$

donde:

$\ln(IS)$ = logaritmo natural del índice de sitio

H_{dom} = altura dominante (m)

E_i = edad de la medición (a partir del dap)

E_b = edad base (25 años)

a, b, k = parámetros de la ecuación general

Uno de los supuestos aplicados para generar estas ecuaciones de índice de sitio, es que los árboles muestreados mantuvieron una posición dominante durante todo su desarrollo, aspecto que es esencial en la determinación del índice de sitio (Daniels *et al.* 1982). Sin embargo, es difícil afirmar con certeza que esa condición se cumple plenamente en el presente estudio. La mayoría de los sitios mostraron alguna evidencias de intervenciones antrópicas en años pasados (resinación, ocoteo⁴, daño de incendios, pastoreo) que no permiten afirmar con plenitud tal suposición. Sin embargo, en el análisis fustal no se encontraron evidencias de supresión lo cual minimiza ese peligro, a excepción de un solo árbol que presentaba notables diferencias en el espesor de anillos (estrechamientos seguidos de ensanchamientos bruscos), lo cual pudo ser evidencia de haber sufrido supresión en el pasado. Este árbol se eliminó del análisis.

Otra fuente de variación es que, se consideró que cada uno de los anillos representa un año de edad. Así, se asume que durante el desarrollo del árbol no hubo variaciones climáticas fuertes que pudieran haber dado lugar a la formación de anillos falsos para un mismo año.

Otra fuente de variación en el análisis fustal es que, es difícil hacer coincidir exactamente la edad con la altura alcanzada a esa edad en las secciones transversales muestreadas. Por lo que

⁴ocoteo= Extracción de trozos de madera impregnados de resina, de aproximadamente 50 cm de largo

fue necesario asumir que la edad determinada en cada una de las secciones del fuste, correspondía exactamente a la altura alcanzada a esa edad, lo cual en muchos casos no es cierto, incurriendo en subestimaciones de la altura en relación a la edad.

6.1.2 Selección entre el modelo de intercepto común y pendiente común (Validación de los modelos).

La validación es el proceso de determinar si un modelo representa en forma adecuada o no la realidad (Alder 1980). Es una metodología para comparar las diferencias entre lo observado en el campo y lo estimado por el modelo.

Los estadísticos obtenidos de la validación son presentados en el Cuadro 5. En ambas validaciones, el modelo de intercepto común presenta la menor suma de cuadrados de los residuales (suma de cuadrados del error).

La desviación estándar, indicador del ámbito de confiabilidad de las estimaciones del modelo, es también menor en el modelo de intercepto común.

En el análisis gráfico de los residuos, se observó que el modelo de intercepto común no muestra ningún sesgo sistemático en relación a la edad y la calidad del sitio en ambas validaciones (Anexo 1). Cualquier sesgo sistemático mostrado por el modelo hacia el rango de edades incluídas en los datos computados, invalidaría el concepto de índice de sitio promedio (Campos 1989c).

Cuadro 5. Estadísticos obtenidos en la autovalidación y validación independiente para los modelos de intercepto común y pendiente común del modelo de Schumacher, para *P. oocarpa* en la RBSM, Guatemala.

Tipo de Validación	Modelo	Numero de parcelas	Estadísticos		
			No. Obsv.	SCE	STD
Validación con mismos datos	Intercepto común	38	190	1288.8	1,57
	Pendiente común	38	190	2207.1	2,51
Validación Independiente	Intercepto común	9	38	154.9	2.046
	Pendiente común	9	38	189.4	2.262

SCE = suma de cuadrados del error

STD = desviación estándar (m).

Las diferencias entre los índices de sitio estimados por ambos modelos, en función del total de pares de datos obtenidos del análisis fustal, son presentados en la Figura 3.

Nótese que a medida que los datos se alejan de la edad base (25 años), las diferencias son mayores. Esto corrobora lo expresado por Campos (1989b) y Hughell (1991), quienes señalan que a medida que la edad de predicción se va alejando de la edad base, va disminuyendo la confiabilidad de la predicción del índice de sitio por los modelos.

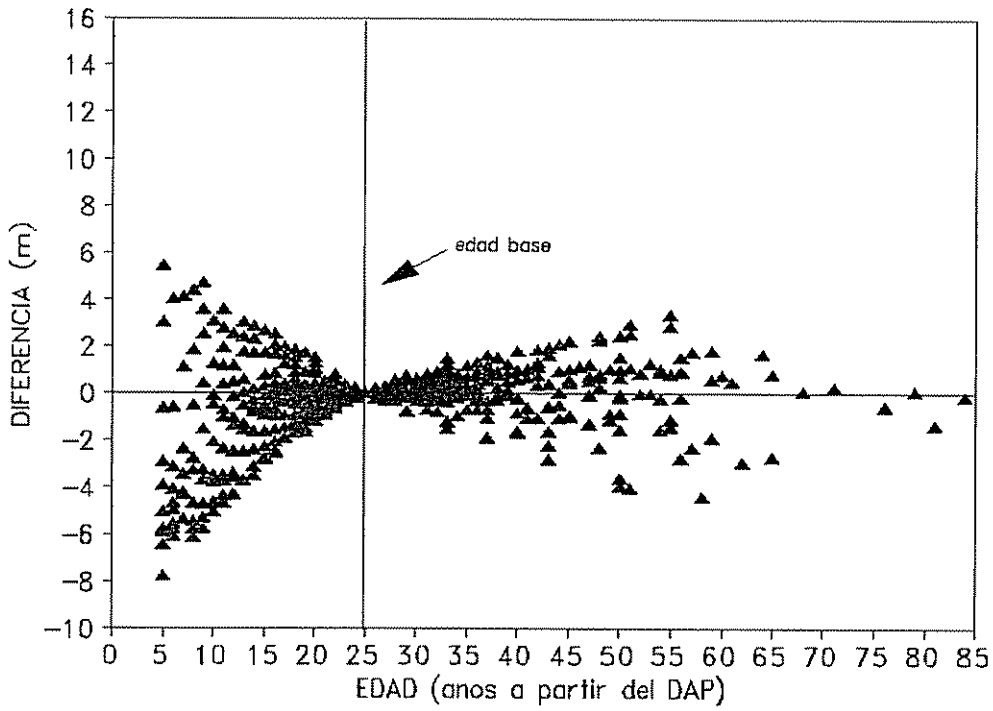


Figura 3. Diferencias entre los valores de índice de sitio (m), estimados por los modelos de intercepto común y pendiente común de Schumacher, para los pares de datos edad–altura obtenidos del análisis fustal de *P. oocarpa* en la RBSM, Guatemala.

Las diferencias son más evidentes en los primeros 10 años que a edades mayores a los 50 años. Sin embargo, la cantidad de datos analizados a edades mayores fue mucho menor, por lo tanto cubren menor variación entre sitios, quizá por esa razón no es posible apreciar en forma objetiva las diferencias entre ambos modelos a esas edades.

Con base en lo observado en la Figura 3, se deduce que ambos modelos pueden ser utilizados para estimar el índice de sitio con resultados muy similares (diferencias menores a 2 m), dentro de un rango de edades que van desde los 18 hasta los 35 años.

6.1.3 Construcción de curvas de índice de sitio y agrupación en clases de sitio

En el Cuadro 6, se presentan la media y el rango de variación de los índices de sitio estimados por ambos modelos, a una edad base de 25 años.

Para el caso del modelo de intercepto común (modelo seleccionado), el rango de variación en el índice de sitio en las parcelas de muestreo es de 13,09 m (Cuadro 6).

Con base en ese rango de variación y la desviación estándar del índice de sitio promedio, se definió el número y el ámbito de las clases de sitio (Vásquez, 1987). Partiendo de la curva del índice de sitio promedio (19.2 m), los límites superior e inferior de las siguientes curvas, se definieron sumando o restando a este valor el valor de media desviación estándar: $IS \text{ promedio} \pm 1/2 \text{ Desviación estándar}$.

Con fines prácticos se consideraron valores enteros del índice de sitio promedio y de la desviación estándar, es decir 19 y tres respectivamente, de esa manera, el intervalo en metros a la edad base entre las curvas generadas quedó en tres metros.

Cuadro 6. Variación en el índice de sitio por parcela, estimado por el modelo de Schumacher a una edad base de 25 años, para *P. oocarpa* en la RBSM, Guatemala.

	Intercepto común	Pendiente común
IS Promedio (m)	19,2	19.8
IS Máximo (m)	25,8	25.0
IS Mínimo (m)	12,6	13.8
Coefficiente de Variación (%) (entre parcelas)	17,8	18,6
Desviación estandar (m)	3,3	3,7

Una de las aplicaciones del conocimiento de los valores de índice de sitio, es la de describir la calidad de sitio en forma cualitativa, tal como alta, media, baja. Para ello se agrupan los valores de índice de sitio en clases, las cuales suelen designarse con números romanos (Castaños 1962).

Se definieron cinco clases de sitio, aún cuando el número de parcelas en la clase V fue muy bajo en relación a las otras clases (Cuadro 7). Se decidió mantener esta clase debido a que, las observaciones de campo indican que es posible encontrar sitios con características similares a las parcelas comprendidas dentro de esta clase (pedregosidad, bosques ralos, etc), que no fueron muestreadas por presentar rodales menos apropiados para este tipo de estudio. La distribución de parcelas por clase de sitio se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Distribución de las parcelas de muestreo por clase de sitio y valores máximo, mínimo y medio del índice de sitio dentro de cada clase. *P. oocarpa*, RBSM, Guatemala.

Clase de Sitio	Ambito (m)	Numero Parcelas	Indice de Sitio		
			Mínimo	Medio	Máximo
I	$\geq 23,5$	6	23,8	24,7	25,7
II	20,5 - 23,49	7	21,1	21,7	22,6
III	17,5 - 20,49	13	17,7	19,2	20,4
IV	14,5 - 17,49	9	15,2	16,3	17,3
V	$\leq 14,9$	3	12,6	12,9	13,5

La mayor cantidad de parcelas de muestreo (58%), se encuentran dentro de las clases III y IV, lo cual principalmente se debe a que la disponibilidad de rodales para hacer el estudio fue mayor en estas clases de sitio. Es en esas clases donde aún existen remanentes de bosque que por su productividad relativamente baja, no han sido objeto de fuertes explotaciones forestales. Por el contrario, los sitios de clase I y II fueron menos frecuentes debido a extracciones forestales de los rodales dentro de estos sitios.

En las regiones como Mal Paso (sitio 3) y Cerro las Cañas (sitio 4), se encontraron rodales jóvenes (menos de 20 años) con indicios de un buen crecimiento (desarrollo de altura, densidad, calidad de fustes) que hace suponer que se trata de clases de sitio I ó II.

Para diferenciar gráficamente las clases de sitio, se generaron curvas polimórficas de índice de sitio, aplicando la ecuación ajustada para el modelo de intercepto común de Schumacher [6.2], a una edad base de 25 años, y considerando la edad a partir del diámetro a la altura del pecho (1,30 m). Estas se presentan en la Figura 4.

Las curvas se han construido hasta una edad de 65 años, aún cuando las observaciones en la parte superior del modelo fueron muy bajas.

Las curvas muestran que en general el crecimiento en altura es mayor en los primeros 10 años después de alcanzar la altura del pecho. Este resultado coincide en parte con los datos obtenidos por Rojas (1988), quien encontró que el máximo incremento periódico anual en altura de un bosque natural de *P. oocarpa* en Chimaltenango, Guatemala, ocurrió en el período de 11 a 15 años (considerando edad total). Después de ese período, el crecimiento decreció en forma pronunciada.

6.1.4 Relación entre el índice de sitio y las variables del rodal

Con el propósito de determinar si el índice de sitio es una buena variable predictora de la productividad de los sitios muestreados, se correlacionó esta variable con las variables del rodal. Los resultados se presentan en el Cuadro 8.

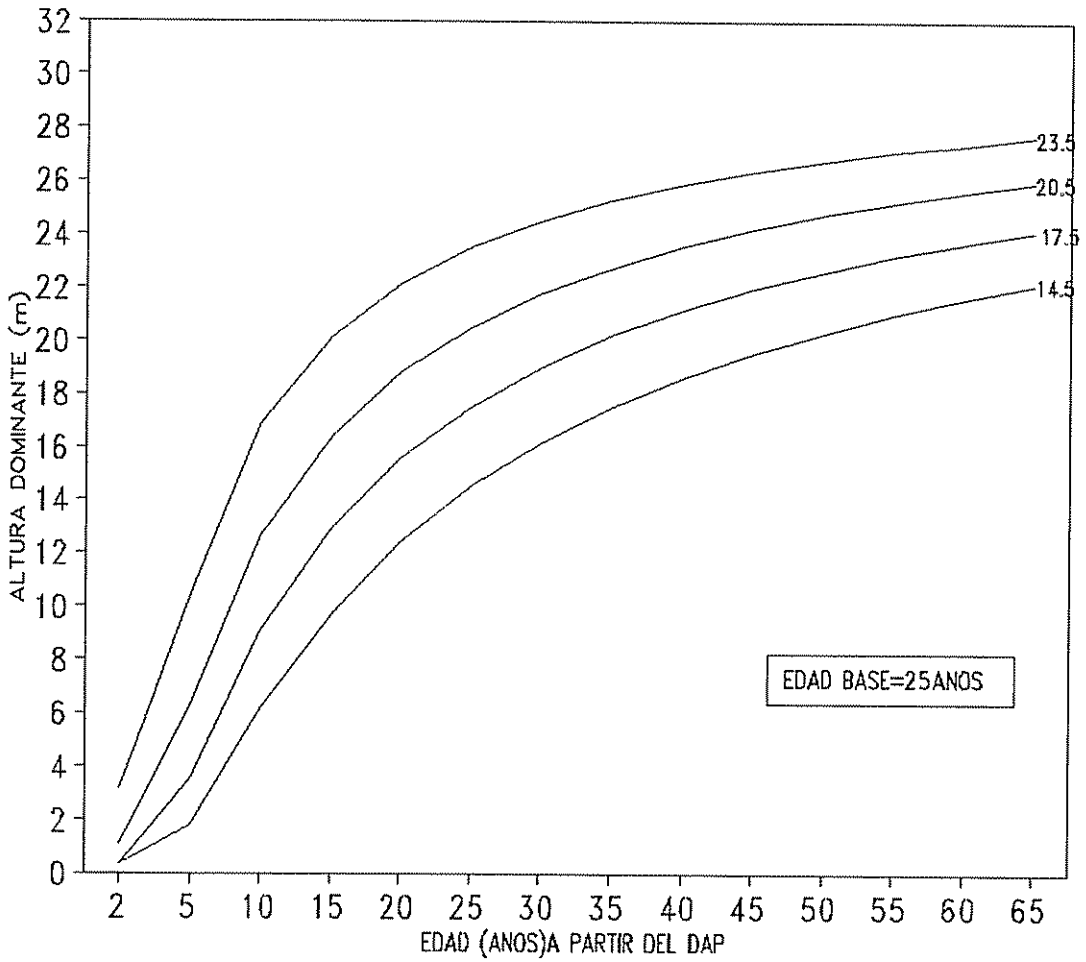


Figura 4. Curvas polimórficas de índice de sitio para *P. oocarpa*, en la RBSM, Guatemala, obtenidas con el modelo de Schumacher, considerando la edad a partir del dap.

Cuadro 8. Correlación entre el índice de sitio de *P. oocarpa* y las variables del rodal, en la RBSM, Guatemala.

Variable del rodal	IS	
	Valor de r	Nivel de probab.
Altura dominante	0,89	0,0001
Diámetro medio	0.31	0,0500
Altura media	0,65	0,0001
Area basal por hectárea	0,52	0,0009
Volumen por hectárea	0,71	0,0001
Número de árboles por hectárea	0,26	0,1100

Se encontró una correlación lineal positiva altamente significativa ($r=52\%$; $P= 0.0009$) entre el área basal por hectárea de *P. oocarpa*, y el índice de sitio. El volumen total por hectárea (m^3/ha) presenta también una correlación lineal positiva altamente significativa con el índice de sitio ($r= 71\%$; $P=0.0001$). Esto indica que se obtendrán mayores producciones en volumen en aquellos terrenos con mayores índices de sitio. Lo anterior concuerda con lo expuesto por Vanclay (1994), en el sentido que el índice de sitio, frecuentemente representa una buena aproximación de la producción de volumen.

Resultados similares fueron obtenidos por Stiff *et al.* (1991) en bosques naturales de *P. oocarpa* en Honduras quienes también encontraron una correlación lineal positiva ($r=42\%$) entre el

índice de sitio y el área basal por hectárea.

En relación a las otras variables del rodal; se encontró que el diámetro medio aunque presenta una correlación significativa ($r=31\%$; $P=0,05$) con el índice de sitio, en el análisis gráfico, no mostró una tendencia definida.

Algunos de los sitios principalmente los más pobres, presentan densidades relativamente bajas (120 ó 140 árboles por hectárea), lo cual se asume, es una densidad natural que se debe únicamente a factores del sitio y no a la influencia de factores antrópicos como los incendios y el pastoreo. Para los efectos de este estudio, se asume que todos los sitios han tenido el mismo efecto de pastoreo y de incendios.

Las correlaciones positivas altamente significativas encontradas entre el área basal, el volumen, y la altura con el índice de sitio (Cuadro 8), indican que esta variable es una buena predictora de la productividad de los sitios muestreados.

Para conocer el potencial productivo de *P. oocarpa* en relación a la variación del índice de sitio en las parcelas muestreadas, las variables del rodal se agruparon en función de la clase de sitio.

Además, se estimaron los incrementos en altura, dap y volumen, en función de la edad promedio de los árboles dominantes por clase de sitio, aún cuando se encontró un amplio rango de edades dentro de cada clase de sitio, lo cual limita la comparación de esas variables entre las clases de sitio. Los resultados obtenidos de ese análisis se presentan en el Anexo 3.

Aunque se trata de bosques naturales los rodales tienen cierta uniformidad en su edad. La variación promedio de la edad dentro de las parcelas de muestreo fue de 6 años, con valores máximos de 11

y mínimos de 2 años de diferencia en edad de los árboles dominantes dentro de una misma parcela.

La variación encontrada en la edad de los árboles dominantes dentro de la misma parcela es consistente con lo señalado por Dolph (1987), quien afirma que la mayoría de rodales de bosques naturales de coníferas son disetáneos, pero están compuestos típicamente de grupos de edad parecida. Este autor señala que, en cada parcela de muestreo una clase de edad principal puede ser identificada y excepto por árboles ocasionales, las diferencias máximas de edad son generalmente de 10 a 20 años.

6.2 Descripción de la variación ambiental en los sitios de muestreo

6.2.1 Variación topográfica

La variación ambiental en general, se trató de explicar a través del método de componentes principales. Sin embargo, éstos no contribuyeron a explicar esa variabilidad, debido a que ninguna de las variables de mayor peso en los tres primeros componentes principales, estuvo correlacionada con el crecimiento en altura de la especie de interés. Este procedimiento ha sido efectivo en estudios similares (Campos 1989c; Vose y Allen 1990; Herrera 1996).

La variación topográfica encontrada, se ilustra con los valores máximos, mínimos, promedio y el coeficiente de variación, así como la distribución de frecuencias de los sitios de muestreo en relación a las variables evaluadas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Distribución de frecuencias de las unidades de muestreo en relación a las variables topográficas evaluadas. P. oocarpa, RBSM, Guatemala.

Variable	Categoría	No. Muestras	Proporción (%)	C.V. (%)
Porcentaje de pendiente	< 20 %	3	8	38 ✓
	20 - 40 %	21	55 ✓	
	> 40 %	14	37	
Posición en la pendiente	Alta	17	45 ✓	43 ✓
	Media	14	37	
	Baja	7	18	
Forma de la pendiente	Convexo	11	29	37 ✓
	Recto	18	47 ✓	
	Cóncavo	9	24	
Exposición	Norte	5	13	38
	Este	11	29	
	Oeste	9	24	
	Sur	13	34	

Entre las variables topográficas, el mayor coeficiente de variación (43%), se presentó en relación a la posición en la pendiente. El 45% de los sitios muestreados se ubican en las partes altas de la pendiente.

El porcentaje mínimo de la pendiente, fue de 12% y el máximo de 68% con un valor medio de 39% y un coeficiente de variación de 37%. Aunque el rango de pendientes es relativamente alto, el 55% del total de sitios se encuentran en pendientes comprendidas entre el 20 a 40%. Esto indica que, en general son terrenos inclinados con pendientes moderadas a fuertes donde la actividad forestal debiera ser su principal uso.

Solamente un 8% de las parcelas se ubican en pendientes menores a 20%. Normalmente, los terrenos con menores pendientes se destinan a usos no forestales en esa región.

No se muestrearon sitios con pendientes superiores a 70%, por las razones señaladas en la sección 5.3.2, aunque es común encontrar ese tipo de pendientes.

En relación a la exposición de la pendiente, un 13% de las parcelas tuvieron una exposición hacia el norte, el resto presentó una exposición predominantemente hacia el sur, sureste o suroeste, situación que predomina en el Distrito Motagua de la Sierra de las Minas, donde se realizó el estudio (Figura 1).

6.2.2 Variación edáfica

6.2.2.1 Variables físicas

Los valores mínimos, máximos, medios y el coeficiente de variación para cada una de las variables físicas del suelo evaluadas en este estudio, se presentan en el Cuadro 10.

La pedregosidad superficial es la variable física que presenta la mayor variación (C.V.= 83%) con valores mínimos de uno por ciento y máximos de 85 por ciento. No se encontró ningún sitio que no presentara alguna evidencia de pedregosidad superficial, y son muy comunes sitios con un 15 por ciento o más de pedregosidad.

No se evaluó la pedregosidad dentro del perfil; sin embargo, es común encontrar rocas de 10 a 20 cm de diámetro dentro los primeros horizontes, las cuales reducen el espacio de crecimiento a las raíces.

La profundidad del suelo, varió desde un mínimo de 15 cm (suelos muy someros) hasta suelos relativamente profundos (más de 100 cm) con un valor medio de 52 cm, y un coeficiente de variación de 44% para los sitios estudiados.

El valor medio de la profundidad del suelo, posiblemente no refleje la media general para toda la región donde se distribuye *P. oocarpa*, la cual podría ser menor. No se muestrearon sitios a altitudes menores de los 700 msnm (por que no se encontraron buenos rodales), y abajo de esas altitudes se observó que los suelos son más pedregosos y menos profundos.

Cuadro 10. Valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación para las variables físicas del suelo. *P. oocarpa*, RBSM, Guatemala.

Variable	Profundidad del suelo (cm)	Valor			
		Min.	Max.	Media	C.V.
Arcilla (%)	0-10	8,4	43,4	18,5	33
	10-30	9,8	49,4	24,8	41
Limo (%)	0-10	11,6	63,0	33,0	36
	10-30	17,8	53,8	30,3	32
Arena (%)	0-10	28,3	71,3	48,5	27
	10-30	24,8	72,4	44,8	30
Profundidad efectiva (cm)		15,0	106,0	52,1	44
Pedregosidad (%)		1,0	85,0	22,5	84
Erosión		1,0	3,0	1,9	38

La profundidad del suelo, presentó una correlación negativa significativa ($r = -0,55$ $P = 0.0003$) con la pedregosidad y una correlación positiva con la altitud ($r = 0,39$ $P = 0.045$), es decir que, a mayor altitud normalmente los suelos tienden a ser más profundos y con menor pedregosidad. Esto posiblemente se debe a cambios en el material parental y a un menor grado de erosión debido a una

disminución de las actividades antrópicas conforme aumenta la altitud.

La mayoría de sitios con profundidades menores a 40 cm presentaron una pedregosidad superficial mayor de 25%. Estas dos variables están muy relacionadas entre si (Cuadro 18) y tienen una marcada influencia sobre el crecimiento de *P. oocarpa* (Cuadro 16).

En relación a la textura del suelo, los porcentajes medios de arena limo y arcilla que se encontraron, indican que la clase textural predominante son las francas o franco arenosas, únicamente el siete porciento de los sitios de muestreo presentan texturas arcillosas, lo cual indica que en general los sitios presentan un buen drenaje y un relativamente bajo grado de meteorización.

La textura del suelo o los efectos derivados de ésta, (drenaje, aireación) se han reportado como variables que se relacionan con el crecimiento de algunos pinos (Wolffsohn 1982; Ortega 1986; Chavez y Gómez 1985). Sin embargo, en la presente investigación no se encontró ninguna correlación significativa entre la textura del suelo y el crecimiento en altura de *P. oocarpa*, lo cual posiblemente se deba a la poca variación existente en las clases texturales en los sitios muestreados.

6.2.2.2 Variables químicas

El muestreo se realizó de abril a julio, periodo que comprende el final de la época seca e inicio de la época lluviosa en la región. Lo anterior indica que se muestreo en dos épocas marcadamente diferentes en relación al contenido de humedad del

suelo. Además, se encontró evidencias de incendios forestales relativamente recientes, lo cual podría también influir en los resultados obtenidos.

En general, todos los nutrientes presentan una marcada tendencia a disminuir en relación a la profundidad del suelo a excepción del magnesio (Cuadro 11). Esto se debe a que es en las capas superiores donde se da la acumulación y descomposición de la materia orgánica y la acumulación de ceniza. La materia orgánica es un reservorio de nutrientes esenciales para la planta (Coile 1952); es decir que el contenido de nutrientes está en gran medida en función de los aportes de la materia orgánica depositada en las capas superficiales.

Un factor común a todos los sitios son los incendios forestales. Las quemas provocan un aumento temporal de nutrientes en el suelo, debido principalmente a la liberación de cationes almacenados en la biomasa (Fassbender y Boernemiza 1987). Esta puede ser la principal causa de las diferencias encontradas en la concentración de nutrientes en las dos profundidades de muestreo.

EL magnesio es el único elemento que no presenta una disminución con la profundidad del suelo, lo cual puede atribuirse a los aportes derivados del material parental. La mayoría de los suelos en los sitios muestreados son derivados de serpentinas. Este tipo de roca son una importante fuente de magnesio (Davey 1983).

Cuadro 11. Valores mínimos, máximos, medios y coeficiente de variación para las variables químicas del suelo en las dos profundidades de muestreo.

Elemento	Prof. suelo (cm)	Valor			
		Min.	Max.	Media	CV
Fósforo (mg/kg)	0-10	1,60	18,3	3,5	78
	10-30	0,85	13,7	2,9	88
Potasio (mg/kg)	0-10	40,00	183,0	88,9	39
	10-30	15,00	148,0	66,2	54
Calcio cm(+)kg ⁻¹	0-10	0,94	6,8	3,5	44
	10-30	0,62	6,3	2,0	57
Magnesio cm(+)kg ⁻¹	0-10	0,62	8,1	2,5	81
	10-30	0,41	12,3	2,7	102
Manganeso (mg/kg)	0-10	11,00	187,0	47,5	71
	10-30	2,50	160,0	27,0	119
Zinc (mg/kg)	0-10	0,50	5,0	1,4	84
	10-30	0,50	3,0	0,8	74
Cobre (mg/kg)	0-10	0,50	2,0	0,8	48
	10-30	0,50	2,0	0,9	43
Hierro (mg/kg)	0-10	11,00	135,0	41,8	70
	10-30	11,50	95,0	34,9	56
Aluminio cm(+)kg ⁻¹	0-10	0,00	9,0	1,1	161
	10-30	0,00	9,0	1,7	124
Materia org. (%)	0-10	2,00	9,7	5,4	40
	10-30	0,50	5,4	2,3	57
pH	0-10	5,00	6,3	5,6	6
	10-30	5,00	6,2	5,7	6

El pH es la variable que menor variación presenta, pero también disminuye a la profundidad de 10-30 cm, lo cual puede ser atribuido a que el contenido de bases es menor a esa profundidad. Los valores máximos y mínimos de pH en todos los sitios, se encuentran dentro del rango óptimo reportado para los pinos que es de 4,5 a 6,5 (Davey 1983).

Las bajas concentraciones de la acidez intercambiable (Al+H), y el rango de valores del pH, parecen indicar que el aluminio no presenta ningún problema para el crecimiento natural de *Pinus oocarpa* en la región.

6.2.2.3 Generalidades sobre la fertilidad de los suelos en los sitios de muestreo

La comparación de la concentración de nutrientes tanto en el suelo como en el follaje, con niveles críticos reportados para la especie de interés, nos permite evaluar la fertilidad de los sitios de muestreo (Cannon 1983).

Ante la escasa información existente sobre los niveles críticos para *P. oocarpa*, en el presente estudio se utilizan los niveles dados por Davey (1983) para pinos en general, aunque los métodos de determinación de laboratorio no son exactamente los mismos.

Las comparaciones con los niveles encontrados en el suelo se presentan en el Cuadro 12.

Se encontraron deficientes a la profundidad de 0-10 cm, el fósforo, zinc y cobre, y a la profundidad de 10-30 cm, el fósforo, potasio, manganeso, zinc y el cobre.

Cuadro 12. Comparación de concentraciones de nutrientes encontrados en las dos profundidades de muestreo, con los niveles críticos para pinos, dados por Davey (1983).

Elemento	Prof. Suelo (cm)	Valor		Nivel Crítico ¹
		Media	Mediana	
Fósforo mg/kg	0-10	3,50	2,90	3 - 4
	10-30	2,90	2,10	*
Potasio cm(+)kg ⁻¹	0-10	0,20	0,20	0,1
	10-30	0,17	0,16	**
Calcio cm(+)kg ⁻¹	0-10	3,50	3,40	0,2
	10-30	2,40	1,70	**
Magnesio cm(+)kg ⁻¹	0-10	2,50	1,60	0,2
	10-30	2,70	1,50	*
Manganeso mg/kg	0-10	47,50	40,00	5,0
	10-30	27,00	13,50	
Zinc mg/kg	0-10	1,40	1,00	1,5
	10-30	0,80	0,50	+
Cobre mg/kg	0-10	0,80	0,50	1,0
	10-30	0,90	1,00	++
Hierro mg/kg	0-10	41,90	32,70	5,0
	10-30	34,90	31,20	++

1= Niveles según Davey (1983)

* =Extracción con KCL 1%N

** =Método Bray II

+ =Método Nuevo Malich

++ =Método doble ácido.

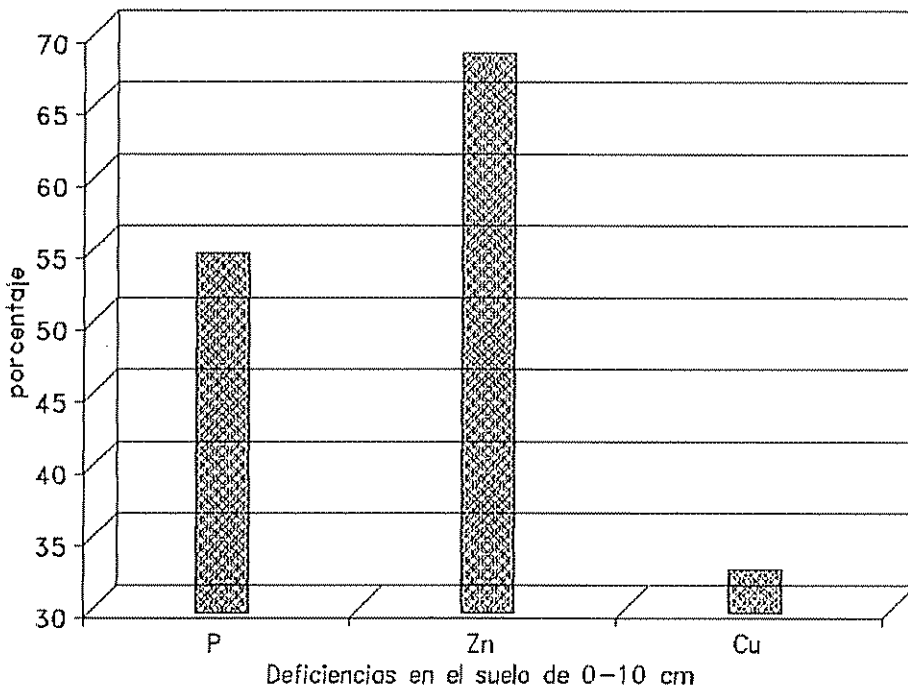
El fósforo a la profundidad de 0-10 cm, se encontró deficiente en más del 50 por ciento de los sitios (Figura 5). Las deficiencias de este elemento para la profundidad de 10-30 cm se presentaron en más del 70 por ciento de los sitios muestreados (Figura 6).

El contenido de fósforo total disminuye con la profundidad del suelo, lo que está relacionado con una disminución de la materia orgánica y los fosfatos orgánicos (Fassbender y Bornemiza 1987). En los sitios de muestreo la materia orgánica presenta una disminución en más del 50% con la profundidad de muestreo, paralelamente disminuyen las concentraciones de fósforo, potasio y calcio (Cuadro 12).

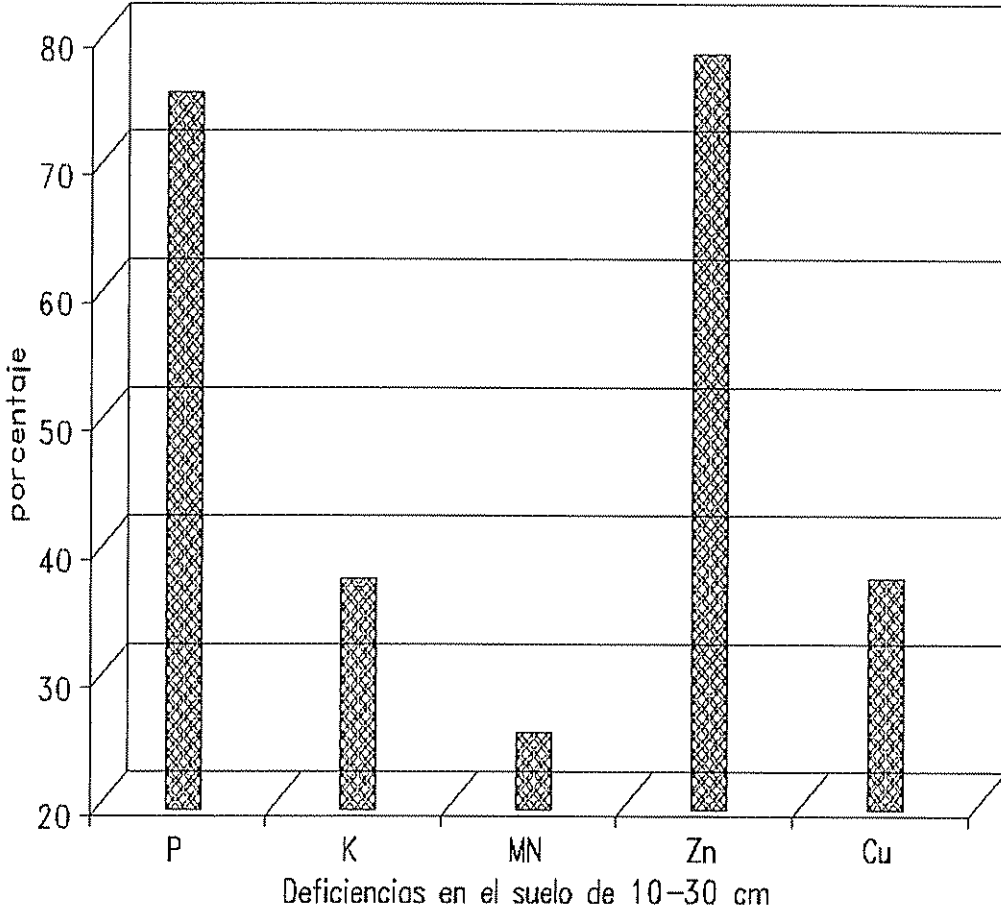
El potasio se encontró deficiente a la profundidad de 10-30 cm en el 36% de los sitios muestreados. Este elemento puede perderse como ión disuelto en las aguas de escorrentía y percolación y en los sedimentos arrastrados por la erosión (De las Salas 1987). El ión K^+ es más móvil en el suelo en comparación con los divalentes Ca^{+2} y Mg^{+2} (Olsson *et al.* 1996). Lo cual explica el porque de las mayores pérdidas de este elemento comparado con el Ca y el Mg en los sitios de muestreo.

No se encontró deficiencias en el contenido de calcio en ninguna de las dos profundidades de muestreo. No obstante en la comparación con los niveles foliares es el elemento que aparece deficiente en el mayor número de sitios (Figura 7). Esto hace suponer que, si la concentración de este elemento es adecuada en el suelo y se presenta deficiencias en el follaje, puede ser que otra variable está inhibiendo su absorción. Posiblemente la humedad disponible dentro del perfil en la época del muestreo, ya que la fracción soluble de este elemento es la que ofrece en forma más directa el nutrimento a la planta (Bertsch 1995).

El zinc es el elemento que se presentó deficiente en el mayor porcentaje de los sitios en ambas profundidades de muestreo (Figuras 5 y 6). Sin embargo, este elemento al igual que los otros micronutrientes que presentaron deficiencias (cobre y manganeso), parece ser que no tienen mayor efecto sobre el crecimiento de *P. oocarpa*, debido a que no se observaron síntomas de deficiencias en el follaje y además, no se encontró ningún tipo de correlación significativa ($P < 0,05$) entre estos nutrientes y el índice de sitio de esta especie.



Figuras 5. Distribución del porcentaje de los sitios según las deficiencias de nutrientes encontradas a la profundidad de 0-10 cm, en relación a los niveles críticos dados por Davey (1983).



Figuras 6. Distribución del porcentaje de los sitios según las deficiencias de nutrientes encontradas en la profundidad de 10-30 cm, en relación a los niveles críticos dados por Davey (1983).

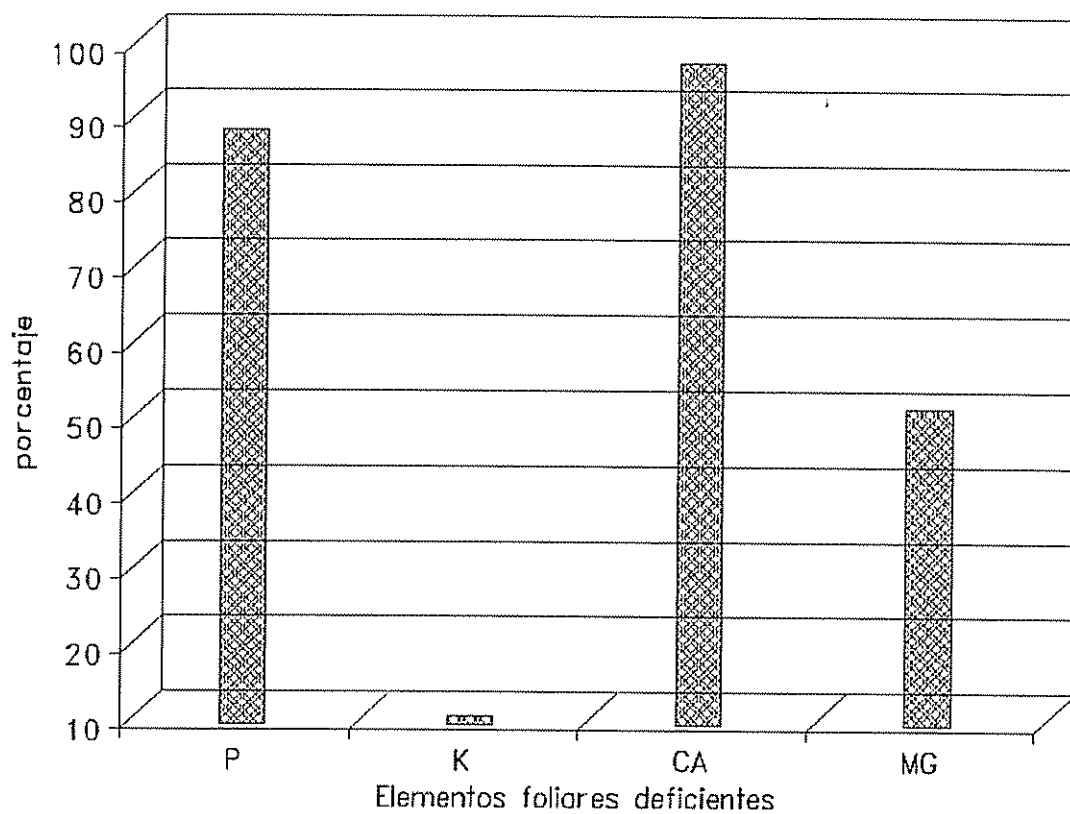


Figura 7. Distribución del porcentaje de sitios según las deficiencias encontradas en la concentración de nutrientes foliares, comparados con los niveles críticos dados por Davey (1983).

Con el propósito de evaluar el estado de nutrientes en la planta, se compararon las concentraciones de nutrientes foliares en los árboles muestreados, con los niveles críticos para pinos dados por Davey (1983). Los resultados se presentan el Cuadro 13.

El fósforo foliar se encontró deficiente en el 84 por ciento de los sitios muestreados (Figura 6). Este elemento también se encontró deficiente en el suelo, lo cual explica su deficiencia en el follaje. Según Fassbender y Bornemiza (1987), el fósforo es relativamente estable en los suelos, lo que resulta en una baja solubilidad que puede provocar deficiencia en las plantas a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos en el suelo.

Cuadro 13. Valores mínimo, máximo, medio y coeficiente de variación para la concentración de nutrientes encontrados en tejido vegetal de *P. oocarpa*, y comparación con niveles críticos reportados por Davey (1983).

Elemento		Valor				Nivel
		Mínimo	Máxim	Medio	CV (%)	Crítico ¹
Fósforo	%	0,05	0,2	0,08	31	0,10 %
Potasio		0,23	0,9	0,52	28	0,35 %
Calcio		0,09	0,3	0,16	25	0,30 %
Magnesio		0,05	0,3	0,11	47	0,10 %
Cobre	ppm	0,00	10,0	4,87	34	-----
Zinc		8,00	52,0	19,60	35	5 ppm
Hierro		40,00	170,0	64,90	45	40 ppm
Manganeso		52,00	408,0	166,00	39	10 ppm

1 = Niveles reportados por Davey (1983)

Según método de determinación Sarruge y Haag (1974).

El calcio y el magnesio presentaron niveles adecuados en el suelo (Cuadro 12). Sin embargo, el calcio foliar se encontró deficiente en más del 90% de los sitios muestreados y el magnesio en más del 40%. Lo cual posiblemente se explica por el hecho que la concentración de estos elementos en la fracción soluble del suelo en general son bajas y esta es la forma más directa en que estos nutrimentos pueden ser absorbidos por la planta (Bertsch 1995).

6.2.2.4 Relación entre la concentración de nutrientes foliares con la concentración de nutrientes en el suelo y con el índice de sitio de *P. oocarpa*.

En el Cuadro 14, se presentan los elementos que presentaron una correlación significativa ($P < 0,05$) entre los contenidos en el suelo en las dos profundidades de muestreo y la concentración en el tejido vegetal.

El fósforo, el magnesio y el manganeso presentan una correlación lineal significativa entre las concentraciones en ambas profundidades del suelo y sus respectivos niveles en el follaje. Este resultado significa que hay una relación directa entre el contenido de estos nutrientes en el suelo y la absorción por la planta.

El calcio y el potasio no presentaron correlación significativa en ambas concentraciones, a diferencia de lo reportado en estudios similares (Wang 1994, Turvey y Smerthurst 1994).

El potasio en el suelo presentó una correlación negativa altamente significativa ($r=-0.45$; $P=0.006$) con la concentración de magnesio en el follaje, así también el contenido de magnesio en el suelo y el potasio foliar (Cuadro 14). Las concentraciones foliares de estos dos elementos también presentan una correlación negativa significativa ($r=-0.44$; $P=0.005$). Las relaciones antagónicas encontradas entre estos dos elementos, posiblemente pueden ser explicadas en

términos de la dilución, o bien de las interacciones de naturaleza fisiológica en la planta que involucran cambios en la traslocación de estos elementos (Driessche 1974).

Cuadro 14. Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.05$) entre la concentración de nutrientes en el tejido vegetal y el contenido de nutrientes en el suelo.

Elemento foliar	Elemento en el suelo
Fósforo (%)	P_{0-10} ($r=0.67$; $P=0.0001$)
	P_{10-30} ($r=0.57$; $P=0.0005$)
Potasio (%)	Mg_{0-10} ($r=-0.44$; $P=0.0076$)
	Mg_{10-30} ($r=-0.47$; $P=0.006$)
	Cu_{10-30} ($r=-0.35$; $P=0.04$)
Magnesio (%)	pH_{0-10} ($r=0.55$; $P=0.0005$)
	pH_{10-30} ($r=0.62$; $P=0.0001$)
	K_{0-10} ($r=-0.45$; $P=0.006$)
	K_{10-30} ($r=-0.33$; $P=0.06$)
	Mg_{0-10} ($r=0.79$; $P=0.0001$)
	Mg_{10-30} ($r=0.71$; $P=0.0001$)
Manganeso (ppm)	pH_{0-10} ($r=-0.42$; $P=0.01$)
	pH_{10-30} ($r=-0.39$; $P=0.02$)
	K_{10-30} ($r=0.42$; $P=0.01$)
	Ca_{10-30} ($r=0.43$; $P=0.01$)
	Mn_{0-10} ($r=0.35$; $P=0.04$)
	Mn_{10-30} ($r=0.37$; $P=0.03$)

El análisis de correlación entre el contenido de nutrientes foliares y el índice de sitio, mostró que únicamente existe correlación significativa con el manganeso. La falta de correlaciones consistentes entre el índice de sitio y los constituyentes químicos del suelo y del tejido vegetal, puede deberse a la sensibilidad de las pruebas convencionales (Stiff *et al.* 1991).

La correlación entre el contenido de nutrientes en el tejido vegetal y la concentración de nutrientes en el suelo puede estar afectado por una serie de factores entre ellos:

- la época de muestreo. La concentración de nutrientes en los tejidos de la planta varía durante el año (Driessche 1974). El muestreo se realizó en dos épocas distintas: seca y lluviosa;
- el método de análisis posiblemente no representa lo que la planta puede absorber.

Además de esos factores el contenido de nutrientes foliares también varía en función de la edad del tejido vegetal y la posición de la copa donde se tomen las muestras (Driessche 1974) y la edad de la planta (Turvey y Smethurst 1994).

Para conocer la variación en la concentración de nutrientes foliares en función de la edad de *P. oocarpa*, los contenidos de nutrientes foliares se agruparon por clases de edad de los árboles muestreados (Cuadro 15).

Los resultados muestran una disminución en la concentración de los nutrientes al aumentar la edad de los árboles.

Diferencias estadísticamente significativas ($P= 0.05$) entre las clases más jóvenes y las de mayor edad, se encontraron únicamente para el fósforo, el calcio y el zinc. En el caso del fósforo, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Turvey y Smethurst (1994) en *Pinus radiata*. Estos autores encontraron que la disminución del fósforo con la edad estaba en función de un incremento de la cantidad inmovilizada de este elemento en los restos orgánicos.

Cuadro 15. Variación en la concentración de nutrientes foliares en *P. oocarpa* en relación con la edad de los árboles, en las unidades de muestreo.

Elemento	Edad en años					
	Menor de 30		de 30 a 50		Mayor de 50	
	Media	Obs.	Media	Obs.	Media	Obs.
P (%)	0,098 A	5	0,074 B*	19	0,069 B	13
K (%)	0,53 A	5	0,53 A	19	0,51 A	13
Ca (%)	0,18 A	5	0,17 AB	19	0,15 B	13
Mg (%)	0,12 A	5	0,12 A	19	0,09 A	13
Cu (ppm)	4,80 A	5	4,89 A	19	4,92 A	13
Zn (ppm)	24,20 A	5	18,84 B	19	18,69 B	13
Fe (ppm)	72,70 A	5	60,84 A	19	67,50 A	13
Mn (ppm)	184,20 A	5	168,94 A	19	160,80 A	13

Prueba Duncan * = letras diferentes significa que las medias de los elementos en entre las clases de edad son estadísticamente diferentes a un nivel de $P=0.05$.

6.3 Asociación entre las variables ambientales y el índice de sitio

El Cuadro 16, presenta las variables ambientales que mostraron mayor correlación con el crecimiento en altura dominante de *P. oocarpa*, expresado por el índice de sitio. Estas correlaciones se presentan en forma gráfica en el Anexo 4.

Cuadro 16. Coeficientes de correlación (r%) y su nivel de significancia estadística entre el índice de sitio de *P. oocarpa* y las variables edáficas y topográficas.

Variables		r (%)	Nivel de Probabilidad
Topográficas	Pendiente (%)	-44.5	0.0051
	Posición en la pend.	35.2	0.0301
	Forma de la pend.	67.7	0.0001
Edáficas	Erosión	-54.2	0.0004
	Pedregosidad superficial	-51.8	0.0009
	Profundidad	72.2	0.0001
	P ₁₀₋₃₀	44.6	0.0081
	K ₀₋₁₀	57.6	0.0002
	K ₁₀₋₃₀	41.6	0.0043
	Ca ₀₋₁₀	43.1	0.0087
	Ca ₁₀₋₃₀	32.8	0.0482

La variable ambiental más estrechamente correlacionada ($r=72.2\%$; $P=0.0001$) con el índice de sitio de *P. oocarpa* en la Sierra de las Minas, es la profundidad efectiva del suelo (Cuadro 16).

La profundidad del suelo, ha sido reportada en varios estudios de calidad de sitio como una variable estrechamente relacionada con el crecimiento de los pinos (Castaños 1962; Wolffsohn 1982; Gómez y Tagle 1985; Ortega 1986; Carmean y Schmidt 1987; Narváez 1992; Stiff *et al.* 1991; Ares y Peineman 1992). Esta variable puede ser considerada como un buen índice de la productividad o calidad de un sitio (Donoso 1981).

La importancia de la profundidad del suelo en relación a la productividad de *P. oocarpa*, puede explicarse en función del volumen de suelo disponible para el crecimiento de las raíces. Los árboles que se desarrollan sobre suelos poco profundos tendrán un menor espacio de crecimiento para las raíces y por lo tanto menor disponibilidad de agua y nutrientes para su crecimiento en comparación con aquellos que se desarrollen en suelos más profundos (Pritchett 1986). Es de esperarse que para esta especie, índices de sitios más bajos estén asociados con suelos poco profundos (menos de 50 cm). Sin embargo, no es sólo la cantidad sino también la calidad del espacio de crecimiento para las raíces lo que va a determinar en gran medida la calidad del sitio (Coile 1952).

La profundidad del suelo está estrechamente relacionada con otras variables del sitio (Cuadro 18), principalmente con la forma de la pendiente ($r=60\%$; $P=0.0001$), la pedregosidad superficial ($r=-56\%$; $P=0.0003$), la erosión ($r=-54\%$; $P=0.0005$) y el porcentaje de pendiente ($r=-33\%$, $P=0.046$).

Las correlaciones positivas encontradas entre el índice de sitio y la posición ($r=35\%$) y forma ($r=68\%$) de la pendiente, así como la relación negativa con el porcentaje de pendiente ($r = -45\%$), pueden explicarse principalmente en términos de la disponibilidad de humedad y nutrientes en el suelo para la planta.

La topografía a través de sus tres elementos: forma,

exposición y posición, básicamente modifican el contenido de humedad del suelo (Auten 1945).

En la mayoría de sitios muestreados la duración de la época seca es de por lo menos 5 a 6 meses. Así, se deduce que la disponibilidad de agua dentro del perfil del suelo, es un factor muy importante para el crecimiento del *P. oocarpa* en esa región. Por lo tanto cualquier factor que afecte negativa o positivamente esa disponibilidad de humedad, se debería correlacionar con el crecimiento de esta especie.

Las correlaciones encontradas en este estudio entre el índice de sitio y la forma y posición de la pendiente, indican que *P. oocarpa* se desarrolla mejor en aquellos sitios ubicados en la partes bajas de pendientes cóncavas. Esto se explica por el hecho que normalmente las pendientes bajas tienen un mayor potencial de suplir agua y nutrientes que las pendientes superiores o las posiciones altas y convexas (lomas) en relación a las cóncavas, bajo la misma condiciones de precipitación (Coile 1952).

Este tipo de relación también fue encontrada por Stiff *et al.* (1991) para la misma especie en Honduras; quienes encontraron que los tipos de sitios con formaciones convexas muestran una productividad más baja que los cóncavos debido a que, los primeros tienen suelos más superficiales y de hecho menor humedad disponible, aunque estos autores señalan que en las áreas planas y pobremente drenadas, el efecto sobre el crecimiento es contrario.

La posición y forma de la pendiente, también influye sobre la exposición de los sitios al efecto del viento en la región bajo estudio. Este factor no se evaluó pero si se observó que ejerce alguna influencia sobre el crecimiento en altura de *P. oocarpa*. Sitios ubicados en las partes altas de pendientes convexas y expuestos a fuertes vientos (sitio 3a y 4) presentaron

comparativamente dentro de los mismos sitios, un menor crecimiento en altura, lo cual podría atribuirse a ese efecto.

No se encontró ninguna correlación significativa entre la exposición de la pendiente y el índice de sitio, a diferencia de los resultados obtenidos en estudios para otras latitudes (Castaños 1962, Carmean 1967), lo cual hace pensar que para estas latitudes el efecto de la exposición de la pendiente posiblemente no es significativo.

La correlación negativa que presenta el índice de sitio con respecto a la pedregosidad superficial ($r = -51.8$) en este caso, se explica por el hecho que la rocosidad limita el crecimiento de las raíces y por lo tanto reduce la disponibilidad de nutrientes para la planta. Las rocas ocupan un volumen de suelo que de otra forma, podría ser capaz de suministrar nutrientes y humedad para el crecimiento de las plantas (Carmean y Schmidt 1987).

En bosques naturales de *P. oocarpa* de Honduras, también se reportan correlaciones negativas entre la pedregosidad superficial y la productividad de esa especie (Stiff *et al.* 1991).

La correlación lineal negativa ($r = -54.2$), encontrada entre la erosión y el índice de sitio para *P. oocarpa*, se explica por el hecho que la erosión del suelo implica básicamente una reducción de la fertilidad y del suministro de agua (Lundgren 1980).

Las correlaciones positivas ente el índice de sitio de *P. oocarpa* y las concentraciones de fósforo, calcio, y potasio del suelo, hacen suponer que el crecimiento de esta especie es favorecida por la presencia de éstos nutrientes en el suelo. Un aumento en la concentración de estos elementos en el suelo debería favorecer el crecimiento de esta especie.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Turvey y Smethurst (1994) para *Pinus radiata*, quienes encontraron fuertes correlaciones entre las concentraciones de calcio ($r=0.95$; $P<0.01$) y potasio ($r=0.90$; $P<0.01$) en el suelo y la productividad de esta especie.

El calcio se ha encontrado positivamente correlacionado con el índice de sitio de diferentes especies, en varios estudios: Mader (1963) con *Pinus resinosa*; Brown y Loewenstein (1978) con *Pseudotsuga menziesii*; Ortega (1986) con *Pinus caribaea*; Campos (1989c) con *Eucalyptus camaldulensis*; Herrera (1996) con *Vochysia ferruginea*. Lo cual muestra la importancia de este elemento para el crecimiento de los árboles.

El calcio y el potasio presentan una correlación positiva significativa ($P < 0.05$) con el índice de sitio, en ambas profundidades de muestreo. Por su parte el fósforo presenta una correlación significativa con el índice de sitio ($r=0.45$; $P=0.0081$) únicamente a la profundidad de 10-30 cm. Es a esa profundidad donde se encontraron las menores cantidades de este elemento (Cuadro 12) y donde se encontró el mayor porcentaje de sitios con deficiencia en este nutriente (Figura 6). Esto muestra la importancia de este elemento para el crecimiento de *P. oocarpa*.

El contenido de fósforo a la profundidad de 10-30 cm presenta una fuerte correlación con el contenido de calcio ($r=0.63$) y potasio ($r=0.43$) a la misma profundidad (Anexo 5). Esto corrobora lo expuesto por Remezov y Pogrebnyak (1969), quienes señalan que en la mayoría de los suelos forestales, el fósforo está estrechamente relacionado con el calcio. Según Davey (1983), la suma de cualquiera de las fuentes de fósforo comunes, produce más calcio que fósforo. Esto ayuda a explicar la relación existente entre estos dos elementos.

El calcio por su parte está estrechamente relacionado con la materia orgánica ($r=0.63$). Lo cual se explica por el hecho que la mineralización de una parte apreciable de la materia orgánica devuelve una fracción importante del Ca, de la misma, al suelo (Fassbender y Bornemisza 1987).

Las correlaciones existentes entre los elementos relacionados significativamente con el índice de sitio de *P. oocarpa* muestran que, el efecto sobre el crecimiento de esta especie es el resultado de la acción conjunta de estos elementos y los demás factores del sitio. Por tal razón estos factores no deben considerarse en forma aislada.

Las correlaciones entre el índice de sitio y el contenido de nutrientes del suelo (P, Ca, y K), demuestran que aún cuando normalmente se ha considerado a *P. oocarpa* como una especie de suelos pobres, esta especie puede responder mejor en suelos fértiles. Aún cuando no existe mayor información sobre la respuesta de esta especie a sitios fértiles, ensayos de fertilización realizados en plantaciones jóvenes y a nivel de vivero muestran respuestas positivas principalmente a la aplicación de los macronutrientes N,P,K, y Ca (Castaño y Quiroga 1989; Wolffshon 1982; Peña 1979).

Lo anterior hace suponer que *P. oocarpa* es una especie que se adapta, pero no prefiere sitios poco fértiles, aunque bajo condiciones naturales, su capacidad de adaptación a esos sitios hostiles le da una ventaja competitiva en relación a otras especies.

6.4 Construcción de modelos de predicción de la productividad de *P. oocarpa* en función de las variables ambientales.

El análisis de las correlaciones tanto entre variables ambientales como entre éstas y el índice de sitio (variable respuesta), nos permite definir preliminarmente qué variables explican el mayor porcentaje de la variación encontrada en la productividad de *P. oocarpa*.

La Figura 8, muestra el número de variables necesarias para explicar la mayor variación en el índice de sitio para *P. oocarpa*. Nótese que ocho variables explican aproximadamente el 85 % de la variación existente, y de esas ocho variables tres explican cerca del 70 % de la variación. Esto sirve de fundamento para escoger el número de variables a incluir en el modelo. Esos análisis indican que la variación encontrada puede ser explicada con pocas variables.

Al aumentar el número de variables, también aumenta el coeficiente de determinación y se reduce el error estándar, (Draper y Smith 1981); sin embargo, no se llega a un punto marcado de estabilización del coeficiente de determinación, punto en el cual se alcanzaría la máxima variabilidad explicable con el juego de variables utilizadas para construir el modelo (Herrera 1996).

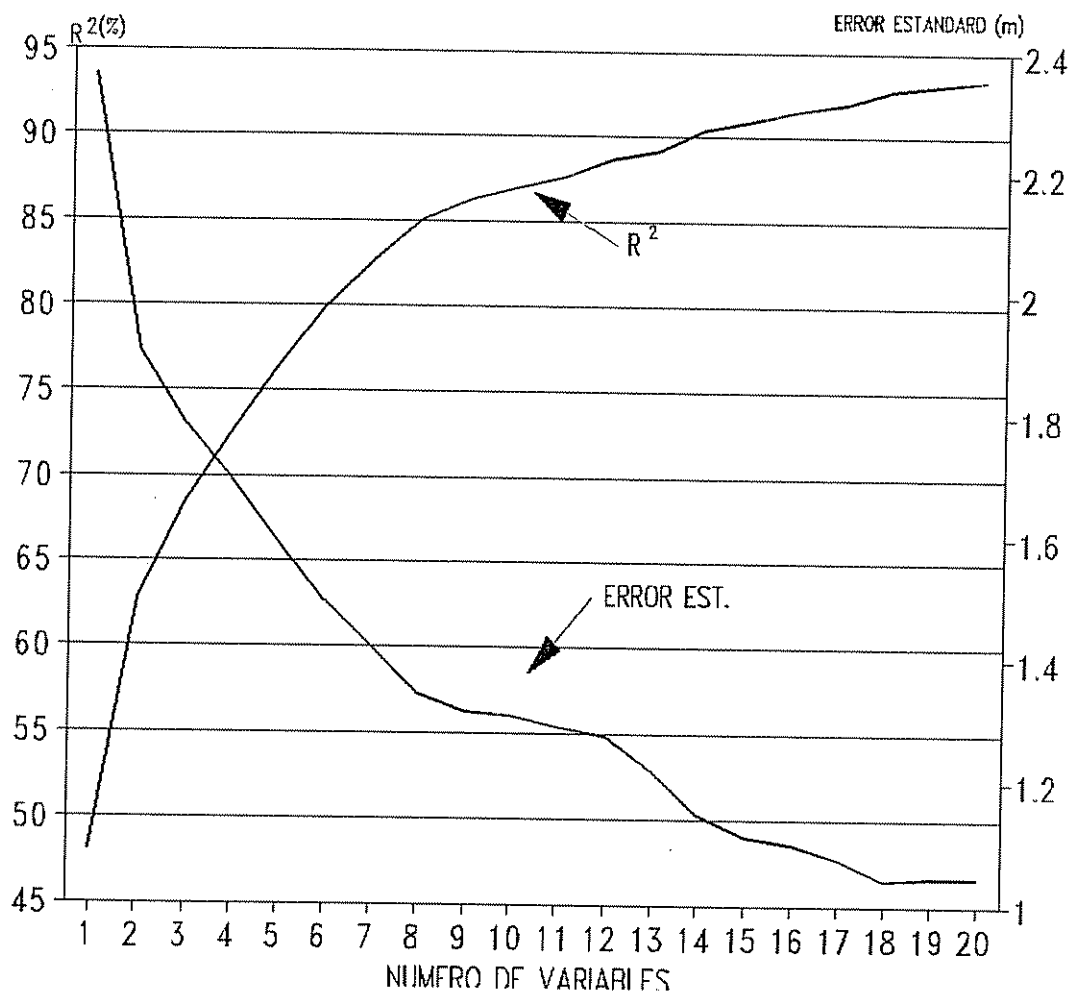


Figura 8. Relación entre el número de variables y el coeficiente de determinación (R^2) y su desviación estándar en la estimación del índice de sitio para *P. oocarpa*, con el modelo de regresión utilizando variables ambientales.

Este comportamiento del coeficiente de determinación, (tendencia a mantener incrementos casi constantes) puede ser atribuido a la variación no explicada por el modelo.

El reconocimiento de las fuentes más importantes de variación no explicada, es una valiosa ayuda en la interpretación de los resultados y el entendimiento biológico y las limitaciones estadísticas de esta clase de estudio (Campos 1989c).

Bajo las condiciones en que se realizó la presente investigación, las posibles fuentes de variación que podrían estar influyendo en la variación no explicada son:

- 1 ♦ Efecto en el pasado de actividades antrópicas (pastoreo, extracciones forestales, incendios, etc.).
- 2 ♦ Factores genéticos. El amplio rango de distribución de *P. oocarpa*, crea la posibilidad de una amplia variación genética, presentando diferencias entre árboles. Algunos árboles destacados pueden estar representando condiciones excepcionales más de origen genético que producto de los factores ambientales.
- 3 ♦ Variación ambiental no evaluada. La variación climática (cantidad y distribución de la lluvia) puede ser un factor importante de variación, pero no se dispone de ese tipo de información, así también la presencia de neblina y el efecto de fuertes vientos en algunos sitios, son otros factores que no fueron evaluados por no existir información al respecto.
- 4 ♦ Época de medición. La época en que se midieron algunos factores de sitio (principalmente los factores edáficos y el contenido de nutrientes foliares), pueden contribuir a esa fuente de variación no explicada, debido a que en unos sitios se midió en época seca y en otros en época de lluvias.
- 5 ♦ Errores de medición ligados a la estimación del índice de sitio asignado a cada parcela, los cuales pueden provenir desde la selección de los árboles dominantes ya que en este caso es bastante difícil garantizar que los árboles seleccionados siempre han sido dominantes, además de los errores inherentes propios a la identificación y conteo de anillos de crecimiento mencionado en párrafos anteriores.

El reconocimiento de las fuentes más importantes de variación no explicada, es una valiosa ayuda en la interpretación de los resultados y el entendimiento biológico y las limitaciones estadísticas de esta clase de estudio (Campos 1989c).

Bajo las condiciones en que se realizó la presente investigación, las posibles fuentes de variación que podrían estar influyendo en la variación no explicada son:

- ♦ Efecto en el pasado de actividades antrópicas (pastoreo, extracciones forestales, incendios, etc.).
- ♦ Factores genéticos. El amplio rango de distribución de *P. oocarpa*, crea la posibilidad de una amplia variación genética, presentando diferencias entre árboles. Algunos árboles destacados pueden estar representando condiciones excepcionales más de origen genético que producto de los factores ambientales.
- ♦ Variación ambiental no evaluada. La variación climática (cantidad y distribución de la lluvia) puede ser un factor importante de variación, pero no se dispone de ese tipo de información, así también la presencia de neblina y el efecto de fuertes vientos en algunos sitios, son otros factores que no fueron evaluados por no existir información al respecto.
- ♦ Época de medición. La época en que se midieron algunos factores de sitio (principalmente los factores edáficos y el contenido de nutrientes foliares), pueden contribuir a esa fuente de variación no explicada, debido a que en unos sitios se midió en época seca y en otros en época de lluvias.
- ♦ Errores de medición ligados a la estimación del índice de sitio asignado a cada parcela, los cuales pueden provenir desde la selección de los árboles dominantes ya que en este caso es bastante difícil garantizar que los árboles seleccionados siempre han sido dominantes, además de los errores inherentes propios a la identificación y conteo de anillos de crecimiento mencionado en párrafos anteriores.

♦ Error por falta de ajuste de los modelos matemáticos involucrados (Campos 1989c). Este autor señala además que, las interacciones entre factores del medio ambiente también son importante fuente de variación no explicada.

Considerando las limitaciones derivadas de las fuentes de variación no explicada, se utilizó el índice de sitio como variable independiente y las variables topográficas y edáficas como variables dependientes, para ajustar un modelo de regresión que permite predecir el índice de sitio en función de las variables ambientales seleccionadas.

En la elaboración del modelo, se utilizó el método de regresión "Forward" (hacia adelante), el cual únicamente selecciona aquellas variables con un nivel de probabilidad dado ($P < 0.05$), con un valor de "F" parcial significativo (Herrera 1996).

El modelo finalmente ajustado para predecir el índice de sitio de *P. oocarpa* en la región donde se realizó el estudio, es el siguiente:

$$IS = 11.17 + 0.08 * \text{Prof. del suelo} + 0.0154 K_{10-30} + 0.8146 Ca_{0-10}$$

$$R^2 = 67 \%$$

$$C.V. = 9,9\%$$

$$R^2_{aj.} = 64\%$$

$$\text{Error estándar} = 1,9 \text{ m}$$

Las variables incluidas en este modelo presentaron una correlación estadísticamente significativa ($P < 0.05$) con el índice de sitio; y no tienen una correlación significativa entre ellas, es decir no se dan problemas de colinealidad (Cuadro 17) y son las que mejor contribuyen a explicar la variación en el índice de sitio.

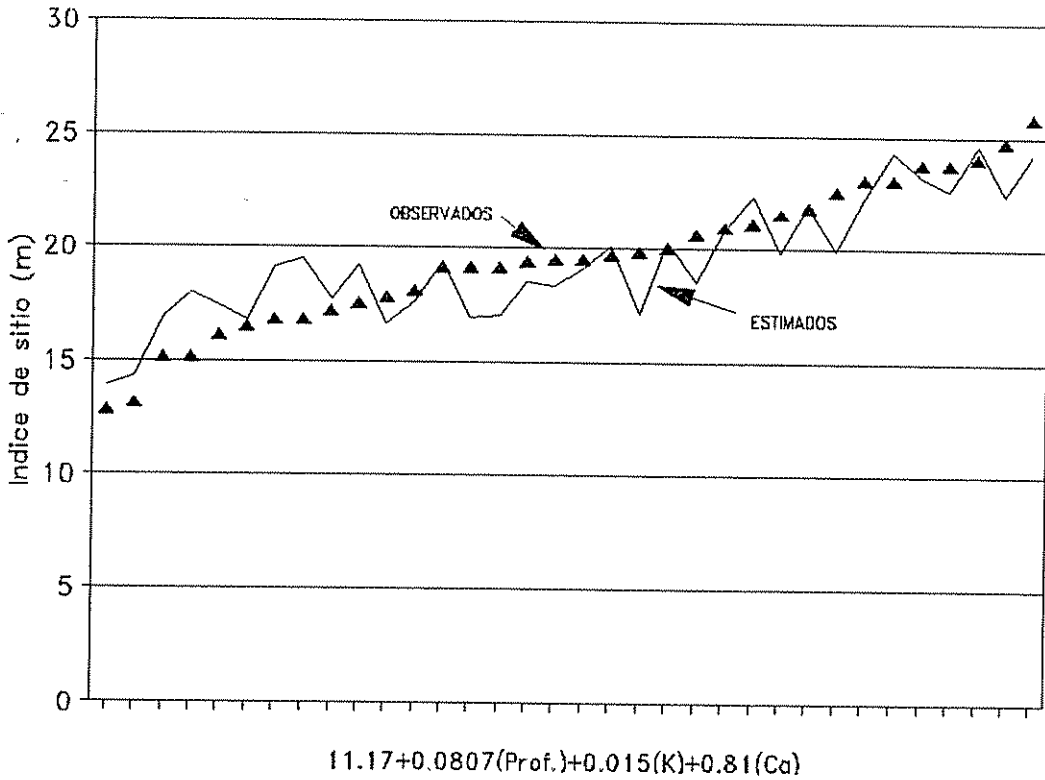
Los resultados del análisis de varianza (Cuadro 17), muestran que todos los valores del Factor de Inflación de la Varianza (FIV) son inferiores a diez, lo cual garantiza que no se tienen problemas de colinealidad entre variables (Drapper y Smith 1981, Campos 1989c).

La dependencia entre variables predictoras podría conducir a estimaciones imprecisas de los coeficientes de regresión (Campos 1989c). En este caso no se tiene ese problema porque las variables incluidas en el modelo no están significativamente correlacionadas.

El valor obtenido de la prueba de F, resultó significativa, lo cual significa que el cuadrado medio del error puede considerarse un estimador insesgado del valor esperado de la varianza poblacional (Drapper y Smith 1981).

La mejor forma de probar las ecuaciones de predicción del índice de sitio, es comparando los valores predichos por el modelo, con los índices de sitio medidos directamente en un grupo de parcelas independiente a las usadas para derivar la ecuación (McQuilkin 1976).

La Figura 9, muestra las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo, utilizando los mismos datos con los que se generó el modelo. Nótese que los valores estimados por el modelo se mantienen bastante uniformes y no muestra tendencia a sobrestimaciones o subestimaciones.



$$R^2 = 67.5 \quad \text{Error estándar} = 1,93 \text{ m}$$

Figura 9. Valores predichos a partir del modelo generado con tres variables edáficas y los valores observados para el índice de sitio de *P. oocarpa* en la Sierra de las Minas, Guatemala. (adaptado de Herrera 1996).

Las variables incluidas en el modelo son las que contribuyen a mejor explicar la variación en el índice de sitio; sin embargo, eso no necesariamente significa que éstas sean la causa directa de la variación en el índice de sitio ni tampoco que variables que no fueron incluidas no tengan un marcado efecto sobre el crecimiento de esta especie.

En el Cuadro 18 se presentan la variables que están correlacionadas significativamente con un nivel de probabilidad menor de 0,05, con las variables incluidas en el modelo.

De los datos presentados en el Cuadro 18, se deduce que el efecto de las variables seleccionadas sobre el crecimiento de *P. occarpa*, no es aislado y posiblemente representa un efecto conjunto entre esas variables. De esta manera se esperaría que los mejores índices de sitio para esta especie se encuentren en aquellos sitios que:

tengan suelos más profundos, menor pedregosidad superficial, menos expuestos a la erosión, con menor porcentaje de pendiente, ubicados en las partes bajas de pendientes cóncavas y con niveles adecuados de calcio, potasio y fósforo en el suelo.

El modelo presentado es tan solo uno de los posible modelos que se pueden ajustar.

Cuadro 17. Resultados del análisis de varianza para el modelo de estimación del índice de sitio para *P. oocarpa* a partir de tres variables edáficas, en la RBSM, Guatemala.

Fuentes de variación	Grados de Libertad	Sumatoria de cuadrados	cuadrado medio	valor F	Prob>F
Modelo	3	233,256	77,752	20,79	0,0001
Error	30	112,186	3,739		
Total	33	345,442			

Variable	GL	Valor de T	Prob > T	FIV
Intercepto	1	9,968	0,0001	0,000000
Profundidad del suelo	1	5,153	0,0001	1,09
K ₁₀₋₃₀	1	2,255	0,0316	1,03
Ca ₀₋₁₀	1	3,768	0,0007	1,07

FIV = Factor de inflación de la varianza.

CUADRO 18. Asociación entre las tres variables incluidas en el modelo para estimar el índice de sitio de *P. oocarpa* y otras variables ambientales incluidas en este estudio. Coeficiente de correlación (%) y valor de probabilidad (P).

VARIABLES EN EL MODELO	$r > 50$	$50 > r < 40$	$40 > r < 30$
Profundidad	Forma de la pend. $r=60$ $P=0.0001$	K_{0-10} $r=47.0$ $P=0.0038$	Pendiente (%) $r=33$ $P=0.046$
	Pedregosidad $r=56$ $P=0.0003$		Altitud $r=39$ $P=0.045$
	Erosión $r=54$ $P=0.0005$		Ca_{10-30} $r=35$ $P=0.045$
Ca_{0-10}	P_{0-10} $r=57$ $P=0.0004$	pH_{0-10} $r=46$ $P=0.0045$	Forma de Pend. $r=33$ $P=0.05$
	MO_{10-3} $r=64$ $P=0.0001$	P_{10-30} $r=46$ $P=0.0048$	Mg_{0-10} $r=32$ $P=0.05$
		ARC_{0-10} $r=45$ $P=0.006$	Fe_{0-10} $r=-38$ $P=0.0208$
		Ca_{10-30} $r=47$ $P=0.0030$	
$Potasio_{10-30}$	K_{0-10} $r=55$ $P=0.0007$	P_{10-30} $r=43$ $P=0.0113$	Pendiente (%) $r=35$ $P=0.042$
	Ca_{10-30} $r=57$ $P=0.0004$	Altitud $r=44$ $P=0.0092$	Forma de $r=37$ $P=0.0319$
	Mg_{10-30} $r=50$ $P=0.0024$	pH_{0-10} $r=-41$ $P=0.017$	MO_{10-30} $r=37$ $P=0.033$
		pH_{10-30} $r=-47$ $P=0.0054$	
		Mg_{10-30} $r=-41$ $P=0.0152$	

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El modelo matemático de Schumacher presentó mejor ajuste que el modelo de Chapman-Richards a los datos de edad-altura dominante para estimar el índice de sitio de *Pinus oocarpa* en la zona de estudio. En el modelo de Schumacher el mejor ajuste se presentó con el modelo de intercepto común. Este modelo no presentó ningún sesgo en la estimación del índice de sitio y no contradujo los supuestos estadísticos en los que se basa el análisis de regresión.
2. Las curvas polimórficas generadas con la ecuación ajustada del modelo de Schumacher considerando la edad a partir del diámetro a la altura del pecho (1,30 m), son las que mejor representan el patrón de crecimiento en altura dominante de *Pinus oocarpa* en la Zona de Amortiguamiento de la Sierra de las Minas.
3. La variación presentada por *P. oocarpa* para alcanzar la altura del pecho (1,30m), indican que el crecimiento inicial de esa especie es probablemente expresión no solamente de la calidad del sitio, sino también de la influencia de factores externos tales como el pastoreo, los incendios, las extracciones forestales, etc.
4. Las correlaciones positivas altamente significativas encontradas entre el índice de sitio con la altura media, área basal y volumen, indican que ésta es una buena variable predictora del potencial productivo de los sitios muestreados.
5. Las correlaciones entre el índice de sitio y las variables ambientales evaluadas, indican que la productividad de *P. oocarpa* (expresado por el índice de sitio) en la zona de amortiguamiento de la Sierra de las Minas, es afectada por la variación topográfica y edáfica, lo cual confirma la hipótesis planteada en esta investigación.

5. La variación en el índice de sitio de *P. oocarpa*, es posible explicarla en un 67 % por la profundidad efectiva y la concentración de calcio y potasio del suelo. Esas variables ambientales su vez, se encuentran muy relacionadas con otras características del sitio tales como la pedregosidad superficial, la forma y porcentaje de pendiente. Las correlaciones positivas entre el índice de sitio de *P. oocarpa* y los contenidos de fósforo, potasio y calcio del suelo, demuestran que esta especie se adapta pero no prefiere sitios de baja fertilidad.

6. Los resultados obtenidos de los análisis de la concentración de nutrientes en el suelo y en el tejido vegetal en relación al crecimiento de *P. oocarpa*, parecen indicar que los micronutrientes, no presentan problema para el crecimiento de esta especie, en el área bajo estudio.

7. Los modelos ajustados conllevan la incertidumbre de las siguientes fuentes de variación: variación genética de la especie entre los sitios muestreados; variación ambiental no evaluada, principalmente factores climáticos; variación en la época de medición de las variables del sitio y los errores de medición y la falta de ajuste de los modelos seleccionados.

Desde el punto de vista metodológico se pueden dar las siguientes recomendaciones:

1. El tamaño de parcela para la estimación del índice de sitio en aquellos rodales con baja densidad natural (generalmente sitios muy pobres), es recomendable que sea mayor al utilizado en este estudio para tener más oportunidades en la selección de los árboles dominantes (mayor número de árboles). Una recomendación preliminar sería utilizar parcelas de 800 m². La forma de parcela que se utilizó, puede resultar ser muy práctica bajo condiciones de escaso

sotobosque como las encontradas en este estudio.

2. El modelo generado con las variables ambientales, deberá ser validado, comparando los valores predichos con los valores observados (índices de sitio estimados directamente en el campo), en parcelas diferentes a las que se utilizaron para su construcción. Eso permitirá fundamentar el ámbito de su aplicación (limitaciones y alcances).

3.¹¹ En posteriores estudios de esta naturaleza, se recomienda muestrear el suelo al final de la época de lluvias para evitar el efecto que las quemadas tienen sobre la concentración de nutrientes en esta región.

4.¹² Aún cuando en este estudio no se encontró una correlación significativa entre el índice de sitio y el contenido de nutrientes foliares, es importante seguir estudiando los mecanismos de absorción de estos elementos por la planta y los métodos de análisis de laboratorio.

5.¹³ Es recomendable hacer una mapeación del área de distribución natural del *P. oocarpa* dentro de la zona de amortiguamiento de la Sierra de las Minas. Posteriormente, realizar un inventario forestal sistemático y desarrollar un mapa de clases de sitio que sirva de base para el ordenamiento y manejo de esos bosques.

8. BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR C, PONCIANO G, DARY F. 1988. Las coníferas de Guatemala. Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Editorial Llerena. 80 p.
- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento; con referencia especial a los trópicos. Roma FAO Montes 22/2.v.2. 198p.
- ARES, A.; ZALBA, P.; PEINEMANN, N. 1991. Relaciones entre factores de sitio y el crecimiento de coníferas introducidas en Ventania (Provincia de Buenos Aires), Argentina. Revista de la Facultad de agronomía, Universidad Nacional de la Plata. (Argentina). tomo 66 y 67:37-48 p.
- ARTEAGA, M. 1988. Factores del sitio que influyen en la productividad de *Pinus patula* Schl. et Cham; en la región de Chignahuapan-Zacatlan, Puebla, México. Colegio de Postgraduados Montecillo México. Agrociencia 72. 133-141.
- AUTEN, J. 1945. Prediction of site index for yellow poplar from soil and topography. Journal of Forestry (EEUU)43(9):662-668.
- BARROS DE, N. 1981. Algunas consideraciones sobre relaciones entre sitio y suelo en los neotropicos. In Actas Symposium IUFRO/MAB/Forest Service (1980, Río Piedras, Puerto Rico). Producción de madera en los neotropicos vía plantaciones. J. Whitmore. Río Piedras, Puerto Rico. p. 133-142.
- BERTSCH, F. 1995. Fertilidad de suelos y su manejo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense del Suelo. 157p.
- BOJORGES S, RAMIREZ M, FIERROS G. 1991. Índice de sitio para oyamel en Zoquiapan, México. Revista Chapingo (México) (75):158-161 p.
- BROWN, G.; LOEWENSTEIN, H. 1978. Predicting site productivity of mixed conifer stands in Northern Idaho from soil and topographic variables. Soil Sci. Soc. Am. Jour. 42:967-971.
- CANNON, P. 1983. Diagnóstico de deficiencias edáficas en el bosque. Octavo informe anual. Fertilización Forestal en el Valle y el Cauca. Cartón de Colombia. p. 99-132.

- CAMPOS, J. 1989a. Asociación del índice de sitio con variables ambientales. In Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala). Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. Rodolfo Salazar. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza. p. 367-386.
- 1989b. Curvas de índice de sitio para *Eucalyptus camaldulensis* en América Central. In Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala). Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. Rodolfo Salazar. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. p. 351-365.
- 1989c. Environmental effects on the productivity of *Eucalyptus camaldulensis*, *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium* in Central America. Tesis Doc. Phill. University of Oxford. 156 p(sin apéndices).
- CARMEAN W. 1967. Soil survey refinements for predicting Black oak site quality in Southeastern Ohio. Soil. Sci. Amer. Proc. (USA)31:805-810
- 1975. Forest site quality evaluation in the United States. Advances in Agronomy 27:209-269
- ; Schmidt M. 1987. Jack pine quality in relation to soil and topography in north central Ontario. Can. J. Res. (Canada)18:297-305.
- CASTAÑO, F.; QUIROGA, F. 1989. Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. In Actas reunión IUFRO (1989, Guatemala). Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple. Rodolfo Salazar. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. p. 247-267.
- CASTAÑOS, M. 1962. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula*, en el norte de Oaxaca. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México. Boletín técnico No. 2. 32p.
- CHAVEZ, H; GOMEZ, T. 1985. Principales interacciones entre los suelos forestales y las coníferas del cerro de la Cruz, Michoacán. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México. Boletín Técnico No. 140. 32p.
- CHINCHILLA MORA, O. 1989. Curvas de índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en la zona de distribución artificial en Costa Rica. Tesis Ing. For. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 84 p.

- COHRAN, P. 1979. Site index and height growth curves for managed even-aged stands of white or grand fir cost of the cascades in Oregon and Washington. Researrch paper PNW-252, U.S. Department of Agriculture Oregon.
- COILE, T. 1952. Soil and the growth of forest. *Advances in Agronomy*. (New York) 4 (1):323-397.
- CLUTTER, J.; FORTSON, J.; PIENAAR, L.; BRISTER, H.; BAYLEY, R. 1983. Timber managment: a quantitative approach. New York. John Willey and Sons 333 p.
- CURTIS, R. 1964. A stem-analysis approach to site-index curves. *Forest science* (10)2:241-256.
- DAVEY, C. 1983. Crecimiento de los árboles y los elementos nutrientes esenciales. Octavo informe anual. Fertilización Forestal en el Valle y el Cauca. Cartón de Colombia p. 13-26
- DOLPH, K. 1987. Site index curves for young-growth California White fir on the western slopes of the Sierra Nevada. Paper PSW-185. Forest Service, U.S. Department of Agriculture. 9p
- DONOSO, Z. 1981. Ecología forestal, el bosque y su medio ambiente. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, editorial Universitaria. 369p.
- DOOLITTLE, W. 1958. Site index comparisons for several forest species in the Southern Appalachians. *Soil Science Society of America*. :455-458.
- DRAPPER, N.; SMITH, H. 1981. Applied regression analysis. Second edition. New York, EEUU. John Wiley & Sons. 709 p.
- DRIESSCHE, R. VAN DEN. 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review* 40(3):347-394.
- ESCOBEDO, A. 1995. Indices de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en los departamentos de Chimaltenango y Sololá. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 82p.
- FASSBENDER, H.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina. Segunda edición. San José, Costa Rica. IICA. 420 p.

- FERNANDEZ, R.; CRECHI, E.; FRIEDL, R. 1994. Evaluación del comportamiento de la altura dominante como medida de la calidad de sitio para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. *Interciencia* (México) 19(6):343-346.
- FRANCKE, C. 1988. Influencia de algunos factores edáficos en el índice de sitio de plantaciones de *Pinus radiata* para la V región. *Ciencia e Investigación Forestal* (Chile) (3):67-79.
- FINEGAN, B. 1995. Introducción a la ecología del crecimiento y rendimiento de los árboles. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 10p.
- FUNDACION DEFENSORES DE LA NATURALEZA. 1992. Plan maestro de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas período 1992-1997. Guatemala. Editorial Transgrafic, Guatemala. 54 p.
- GOELZ, J.; BURK, T. 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* (Canada)22(6):776-784.
- GUERRA L., AGUIRRE B., ZAMUDIO S. 1991. Análisis de algunas estrategias para la estimación del índice de sitio en rodales puros-coetaneos de *Pinus engelmannii* Carr. *Revista Chapingo* (México) (75): 162-166 p.
- HÄGGLUND, B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstract* 42(11):515-527.
- HEGER, L. 1968. A method of constructing site-index curves from stem analyses. *The Forestry Chronicle* 44(4):11-15.
- HEIBERG, S., WHITE, D. 1976. A site evaluation concept. *Journal of Forestry* 54(1):7-10
- 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 MSc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 152 p.
- HOLDRIDGE, L. 1975. Las coníferas de Guatemala. FAO. Informe técnico No 1. Guatemala. 45 p.
- HUGHELL, D. 1991. Lineamientos para el desarrollo de modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento árboles de uso múltiple. Turrialba, Costa Rica. CATIE-ROCAP. 131 p.

- HUSCH, B.; MILLER, CH.; BEERS, T. 1982. Forest mensuration. Tird edition. Editorial John Wiley y Sons. New York. p 281-283.
- ITZEP, M. 1995. Indices de sitio y desarrollo de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus oocarpa Shiede* en las fincas Santa Rosalía, Gualán, Zacapa y Salamá I, Salamá, Baja Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 99p.
- KLEPAC, O. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. 2ed. Chapingo, México, Universidad Autónoma Chapingo. 365p.
- LOEWENSTEIN H.; BROWN G. 1978. Predicting site productivity of mixed conifer stands in Northern Idaho from soil and topographic variables. Soil. Sci. Soc. Am. Journal. 42:967-971.
- LLOYD, T., HAFLEY, W. 1977. Precision and the probability of misclassification in site index estimation. Forest Science 23(4):493-499.
- LUNDGREN B. 1980. Land qualities and growth in the tropics. In Proceedings of the workshop IUFRO 1980, on land evaluation for forestry the Netherkands Laban P. ed. Wageningen, Netherlands. p. 237-252.
- MACHADO, S.; MARCOLIN, M. 1995. Sample size for site index curve construction based on stem analysis of *Pinus taeda* trees in the state of Parana-Brazil. University of Parana, Curitiba, Parana, Brazil. snt.
- MACQUILKIN, R. 1976. The necessity of independent testing of soil-site equations. Soil. Sc. Soc. of Am. Jour. 40(5):783-785 p.
- MARQUES, C. 1992. Evaluating site quality of even-aged maritime pine stands in northern Portugal using direct and indirect methods. Forest ecology and Management (Holanda) 41(3-4):193- 204.
- MONSERUD, R. 1984. Height growth and site index curves for Inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. Forest Science. 30(4):943-965.
- 1987. Variations on a theme of site index. In Actas Proccedings of the IUFRO Conference (1987, Minneapolis). Forest growth modelling and prediction Vol. 1. Alan EK; Stephen Shifley; Thomas Burk. Minneapolis, Minnesota, IUFRO, Forest Service, USDA, University of Minnesota. p. 419-427.

- NICARAGUA, MINISTERIO DEL AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, AGENCIA DANESA PARA EL DESARROLLO INTERNACIONAL (MARENA-DANIDA). 1994. Pinos de Nicaragua. Editorial Presencia Ltda. Colombia 44p
- NUÑEZ, O. 1993. Diagnóstico de las comunidades forestales de los ditritos Motagua y Chilasco, de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas: Informe final fases I Fundación Defensores de la Naturaleza, Guatemala. 33 p.
- OLSSON, B.; BENGTSSON, J.; LUNDKVIST, H. 1996. Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *Forest Ecology and Management*. 84(1-3):135-147.
- ORANTES, F. 1980. Determinación de calidad y estación para *Pinus hartwegii Lindl.* en Zoquiapan, México. Tesis Ing. Agr. Chapingo, México. Universidad Autónoma de Chapingo. 76 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 MSc. Turrialba, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 110 p.
- ORTEGA, A.; MONTERO, G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología (Esp)* (2):155-184.
- PAGE, G. 1976. quantitative evaluation of site potential for spruce and fir in Newfoundland. *Forest Science* 22(2):131-142.
- PEREZ, N; STIFF, T; JHONSON, F. 1990. Índice de sitio y curvas de crecimiento en altura para *Pinus oocarpa Schiede* en la zona central de Honduras. *El Tatascán*,(Honduras) 7(1-2):1-11.
- PRATTS, J. 1962. Ficha forestal de *Pinus oocarpa Schiede*. s.l.,s.e. 6 p.
- PRITCHETT, W. 1986. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. México D.F., México. LIMUSA. 262 p.
- ; FISHER, R. 1987. Properties and management of forest soils. Segunda edición. John Wiley & Sons. New York. USA. 494 p.
- REMEZOV, N.; POGREBNYAK P. 1965. Forest soil science. U.S. Department of Agriculture, the National Science Foundation, Washigton, D.C. Editado por Y. Haver. 261p.

- ROJAS, E. 1988. Estudio del crecimiento y rendimiento de *Pinus oocarpa* Shiede y *Pinus pseudostrobus* Lindl. en San Martín Jilotepeque, Chimaltenango Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 95p.
- SALAS, G. DE LAS 1974. Factores edáficos y climáticos en la clasificación de sitios forestales. Bosques de Colombia (Colombia) 1:15-30.
- 1986. El mantenimiento del sitio en plantaciones forestales de América Latina In Proceedings of a Conference U.S.D.A. (1986 San Juan Puerto Rico). Management of the forest of tropical America: Prospects and technologies. Julio Figueroa. San Juan Puerto Rico. Institute of Tropical Forestry Southern Forest Experiment Station U.S.D.A. p. 335-356.
- 1987. Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América Tropical. San José, Costa Rica. IICA. 447 p.
- SAS Institute Inc. SAS/STAT. 1993. Guide for personal computers. Versión 6.0 edition. Cary NC. SAS Institute Inc. 1028 p.
- SIMMONS, CH.; TARANO, J.; PINTO, J. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Trad. por Pedro Tirano Sulsona. Guatemala, José de Pineda Ibarra. p. 467-469 y 540-551.
- SMETHURST P.; TURVEY N. 1994. Soil types as classes for managing the nutrient status of planted *Pinus radiata* in Victoria, Australia. Australian Forestry (Australia) 57(4):148-154.
- STIFF, C.; DECHERT, T.; PEREZ, N.; VALDEZ, M. 1991. Manual de implementación para la clasificación de la calidad de sitio y productividad en los bosques de pino de las tierras altas del centro de Honduras. ESNACIFOR-COHNDEFOR/USAID, Tegucigalpa, Honduras. 434p.
- STYLES, B.; HUGHES, C. 1983. Studies of variation in Central American pines III: Notes on the taxonomy and nomenclature of the pines and related gymnosperms in Honduras and adjacent Latin América Republics. Brenesia 21:269-291.
- UGALDE, L. 1995. Establecimiento y medición de parcelas de crecimiento en investigación y programas de reforestación con la metodología del Sistema MIRA. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 17 p.

- TASAICO H. 1976. Tipos de bosques Centroamericanos en actual utilización. Curso intensivo sobre Manejo y Aprovechamiento de Bosques Tropicales. Turrialba, Costa Rica. 13p.
- TURVEY, N.; SMETHURST, P. 1994. Nutrient concentrations in foliage, litter and soil in relation to wood production of 7-to 15-year-old *Pinus radiata* in Victoria, Australia. *Australian Forestry* 57(4):157-164.
- VANCLAY, J. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forest. CAB International. Biddles Ltd, Guildford. Wallingford. 312 p.
- VASQUEZ, W. 1987. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 112 p.
- VERDUZCO, J; FULLER, R; MORANDINI Ñ.; MAHIUE, J. 1962. Ecology and silviculture. In Seminar and study tour of Latin-American conifers. México, Secretaría de Agricultura y Ganadería. p 66-82.
- VILLAR, L ; MENDEZ, C.; CORONADO, L. 1993. Evaluación ecológica rápida de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Datos para la Conservación. Guatemala. 57 p
- VINCENT, L. 1975. Manejo de plantaciones forestales con fines de producción. Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes. 152p.
- WANG, G. 1994. White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients. *Canadian Journal Forest Research* 25(1):29-38.
- WOLFFSOHN, A. 1982. Los efectos de sitio, densidad de rodal y fertilizantes en el crecimiento de *Pinus caribaea* en la costa atlántica de Centroamérica. Administración de Desarrollo Ultramar del Reino Unido, Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Honduras, Informe técnico No. 2. 65p.
- . 1984. Estudios silviculturales de *Pinus oocarpa* Schiede en la República de Honduras. Siguatepeque, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Serie Miscelánea No.4 55 p.
- ZAMORA, S. 1981. Algunos aspectos sobre *Pinus oocarpa* Schiede en el estado de Chiapas. *Ciencia Forestal(México)*6(32):25- 53.

ZAMUDIO, S ; FIERROS, G. 1994. Predicción de la calidad de sitio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* a través de las propiedades edáficas. *Interciencia* (México) 19(6):331-335.

ANEXO

Anexo 1. Análisis gráfico de las desviaciones de los residuos obtenidos con los modelos de intercepto común y pendiente común en la autovalidación.

1. Distribución de la normalidad de los residuos

a) Modelo de Intercepto común

Stem Leaf	#
Boxplot	
1 5566777	7
1 000111111122333444	17
0 555555556666666666777777788888899	32
0 0000000011111111112222222333333333444444444	43
-0 444444444333332222222211111110	31
-0 999999888888888777777666666666555555555	42
-1 44432110000000	14
-1 65	2
-2 55	2
0	
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	

prob <W = =0.66

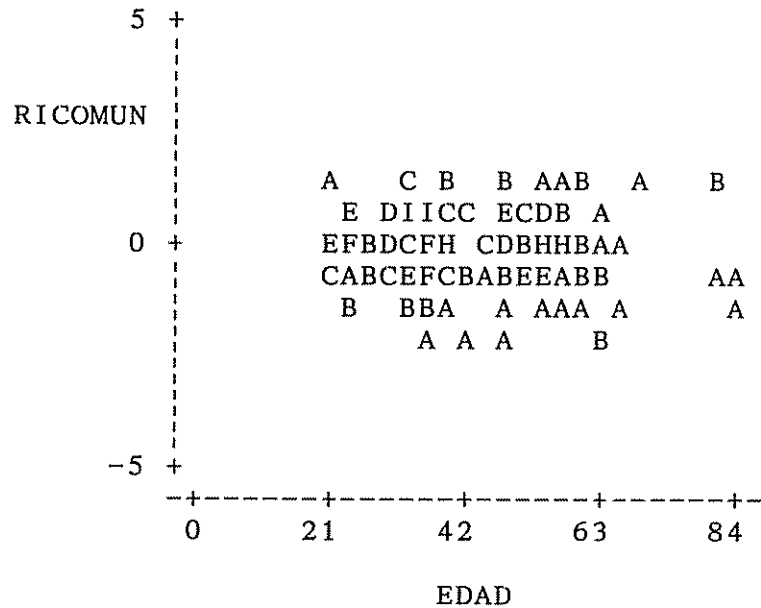
b) Modelo Pendiente común

steam leaf	#
Boxplo	
2	
1 667	3
1 000000011122223333344	21
0 555556666677777788888888999	28
0 00111111122222222222233333334444444444444	42
-0 4444444433333333332222111111100000000	40
-0 9999888888887777776655555555555	32
-1 444211110000	12
-1 998776665	9
-2 30	2
0	
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	

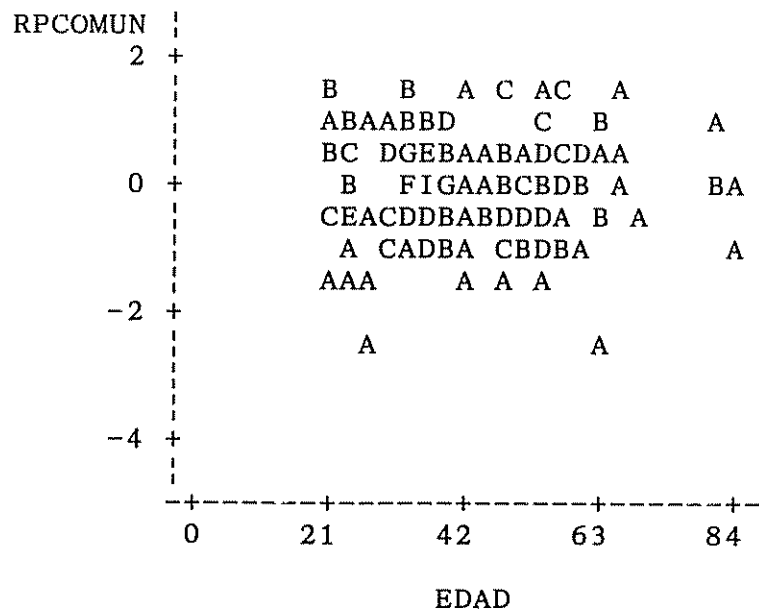
Prob < W =0.16

2. Residuales Vrs edad

a) Residuales del modelo Intercepto común Vrs edad
(Leyenda: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.)

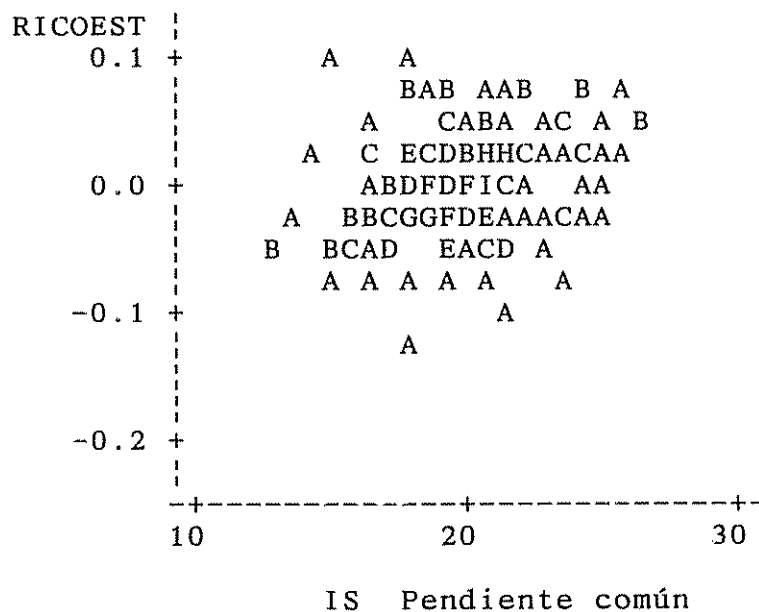


b) Residuales del modelo Pendiente común vrs edad.
(Leyenda: A = 1 obs, B = 2 obs, etc)



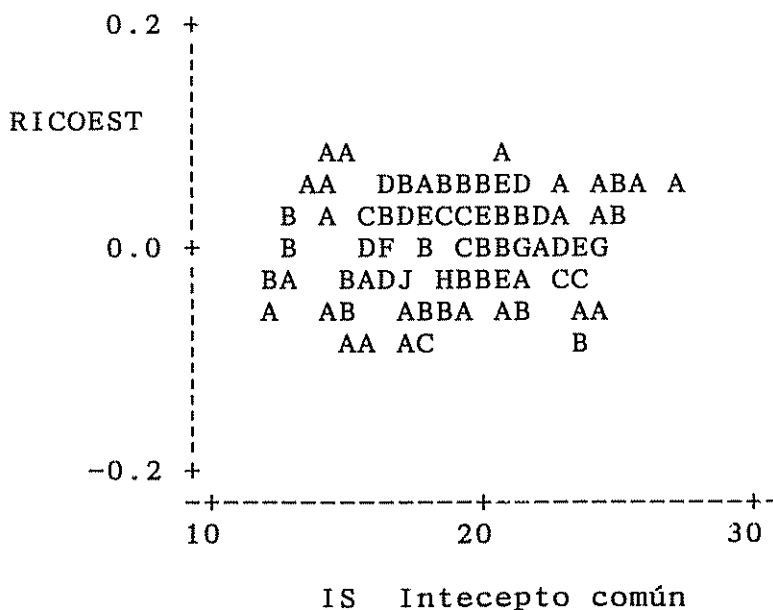
3. Residuales vrs Índice de sitio

a) Residuales estandarizados del modelo pendiente común vrs el índice de sitio obtenido con ese modelo. (Estandarizados dividiendo los residuales por el índice de sitio promedio)



b) Residuales estandarizados del modelo de intercepto común vrs. el índice de sitio estimado por ese modelo.

(Leyenda: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.)



2. Residuales de la validación Independiente

a) Normalidad de residuos para el modelo pendiente común

Stem Leaf	#
Boxplot	
2 0	1
1 5	1
1 1	1
0 55556899	8
0 011111223444	12
-0 44422220	8
-0 86666555	8
-1 410	3
-1 8	1

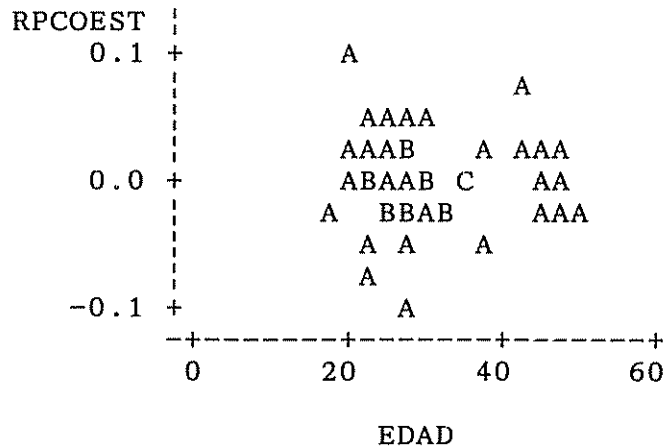
-----+-----+-----+-----+

b) Normalidad de residuos, modelo Intercepto común.

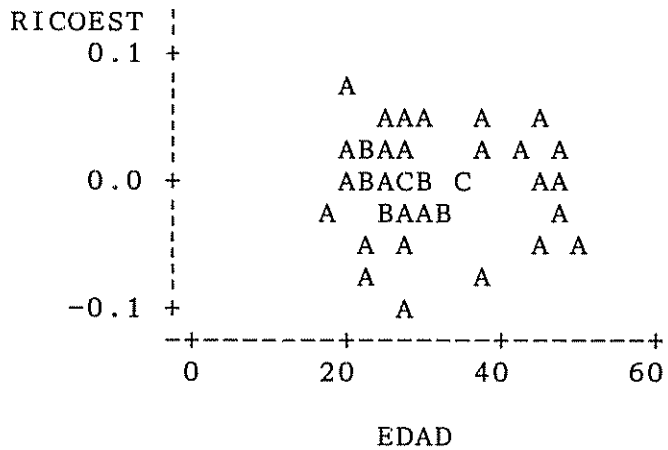
Stem Leaf	#
Boxplot	
2 0	1
1 6	1
1 011	3
0 5557789	7
0 1111222244	10
-0 43322210	8
-0 98766555	8
-1 4200	4
-1	
-2 0	1

-----+-----+-----+-----+

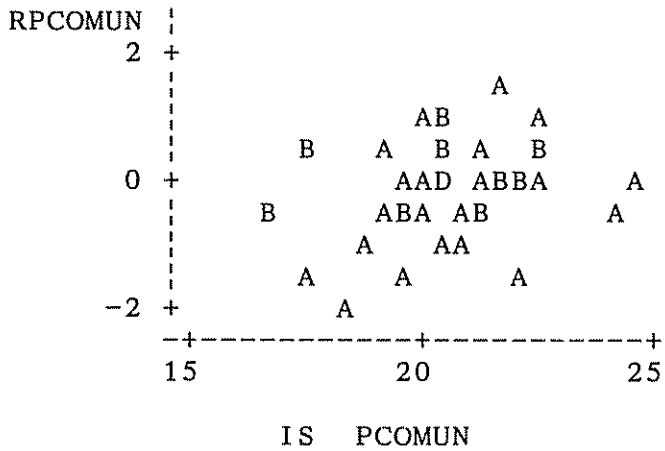
c) Residuos estandarizados del modelo Pendiente común vrs edad
(Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.)



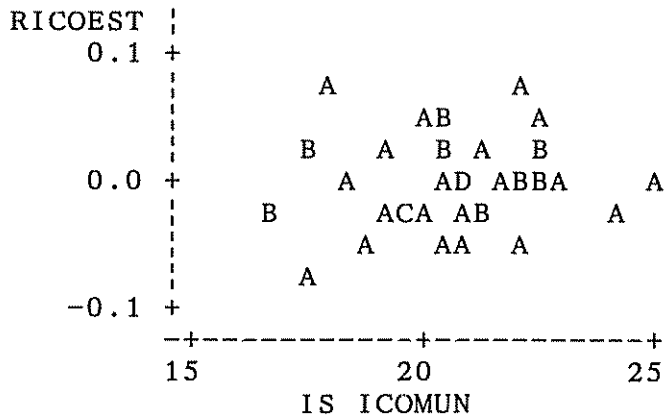
c) Residuos estandarizados del modelo intercepto común vrs edad
 (Legend: A = 1 obs, B = 2 obs,)



d) Residuos estandarizados del modelo de pendiente común vrs el índice de sitio.



e) Residuos estandarizados del modelo de intercepto común vrs índice de sitio



Anexo 2. Parámetros de la ecuación de Chapman-Richarads (Clutter *et al.* 1983) ajustados considerando la edad a partir de 1,30m.

Modelo general:

$$H_{dom} = a (1 - e^{-b \cdot ab})^c$$

Parámetros:

$$a = 25,92$$

$$b = 0,0705$$

$$c = 1,5592$$

Ecuación promedio del índice de sitio

$$IS = a (1 - e^{-b \cdot Eb})^c$$

substituyendo valores:

$$IS = 25,9248 (1 - 2.71828^{-0,0705 \cdot E})^{1,5592}$$

De la ecuación general se pueden derivar dos tipos de modelo

a) Pendiente común (para producir curvas anamórficas):

Manteniendo fijos los valores de b y c, la variación estará en función del parámetro a.

$$a = H_i (1 - e^{-b \cdot Eb})^c$$

$$IS = H_i [(1 - e^{-b \cdot Eb})^c / (1 - e^{-b \cdot Ei})]$$

b) Intercepto común (para producir curvas polimórficas):

Manteniendo fijos los parámetros a y b.

$$c = \ln (H_i / a) / \ln (1 - e^{-b \cdot Ei})$$

$$IS = a (1 - e^{-b \cdot Eb})^c$$

Donde:

IS= índice de sitio

H_i = cualquier medición a la altura i

E_b = edad base

E_i = cualquier medición a la edad i

e = base del logaritmo natural

Anexo 3. Datos de crecimiento y rendimiento (valores máximos mínimos y medios) de *P. oocarpa*, por clase de sitio (sin considerar especies latifoliadas presentes en el rodal).

Calidad de Sitio	Variable	Mínimo	Máximo	Medio
I	edad (años)	22	65	39
	dap (cm)	30,1	47,5	37,7
	hdom (m)	25,3	31,5	27,5
	G (m ² /ha)	18,5	29,3	22,9
	V (m ³ /ha)	160,51	309,91	246,54
	IMA de hdom. (m/año)	0,48	1,14	0,83
	IMA hdom. (m/año) **	0,94	1,06	1,0
	IMA de dap. (cm/año)	0,73	1,37	1,08
	IMA V (m ³ /ha/año)	4,76	10,59	7,16
II	edad (años)	25	58	42
	dap (cm)	30,6	41,7	36,1
	hdom (m)	22,8	28,8	25,6
	G (m ² /ha)	18,9	29,8	25,3
	V (m ³ /ha)	184,29	316,26	248,87
	IMA hdom (m/año)	0,49	0,92	0,65
	IMA hdom (m/año)*	0,82	0,94	0,88
	IMA dap (cm/año)	0,72	1,22	0,91
		IMA V (m ³ /ha/año)	4,23	9,41

* = IMA en altura dominante a la edad de 25 años.

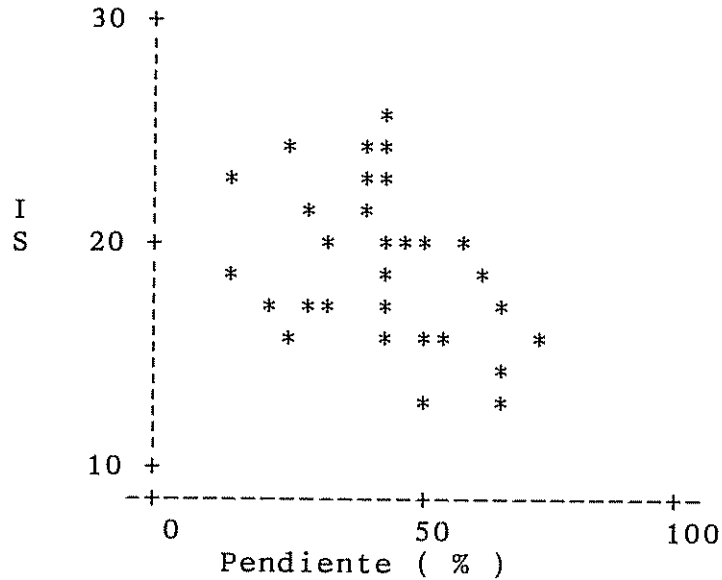
Continuación Anexo 3...

III	edad (años)	24	83	45
	dap (cm)	24,2	45,4	33,7
	hdom (m)	21,4	26,0	24,0
	G (m ² /ha)	12,4	30,5	21,2
	V (m ³ /ha)	99,4	275,1	185,0
	IMA de hdom. (m/año)	0,31	0,89	0,57
	IMA hdom. (m/año)*	0,70	0,82	0,76
	IMA de dap. (cm/año)	0,54	1,12	0,79
	IMA V (m ³ /ha/año)	2,54	7,13	4,3
IV	edad (años)	31	57	42
	dap (cm)	27,5	36,9	32,6
	hdom (m)	18,1	24,2	21,2
	G (m ² /ha)	12,1	25,1	17,1
	V (m ³ /ha)	106,5	187,2	141,7
	IMA de hdom (m/año)	0,41	0,62	0,52
	IMA hdom. (m/año)*	0,58	0,70	0,64
	IMA de dap (cm/año)	0,58	1,15	0,81
	IMA V (m ³ /ha/año)	2,301	5,317	3,559
V	edad (años)	32	54	45
	dap (cm)	28,4	34,8	32,0
	hdom (m)	16,0	20,6	19,0
	G (m ² /ha)	14,5	17,7	15,9
	V (m ³ /ha)	92,74	130,81	110,80
	IMA de hdom (m/año)	0,38	0,50	0,43
	IMA hdom (m/año)*	0,46	0,58	0,52
	IMA de dap (cm/año)	0,53	1,03	0,76
	IMA V (m ³ /ha/año)	2,015	2,898	2,527

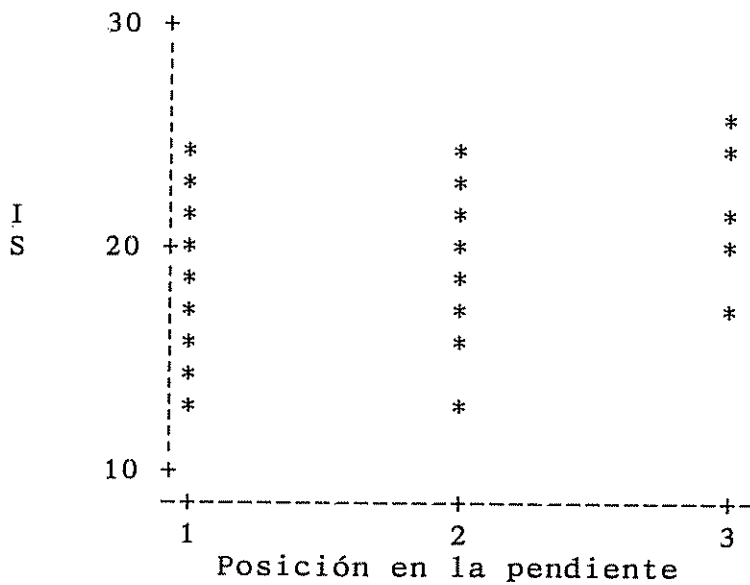
*IMA en altura dominante a la edad de 25 años.

Anexo 4. Relación gráfica entre el índice de sitio (IS) de *P. oocarpa* y las variables ambientales que resultaron con una correlación estadísticamente significativa ($P < 0,05$).

a) Porcentaje de pendiente vrs IS (18 obs. ocultas)

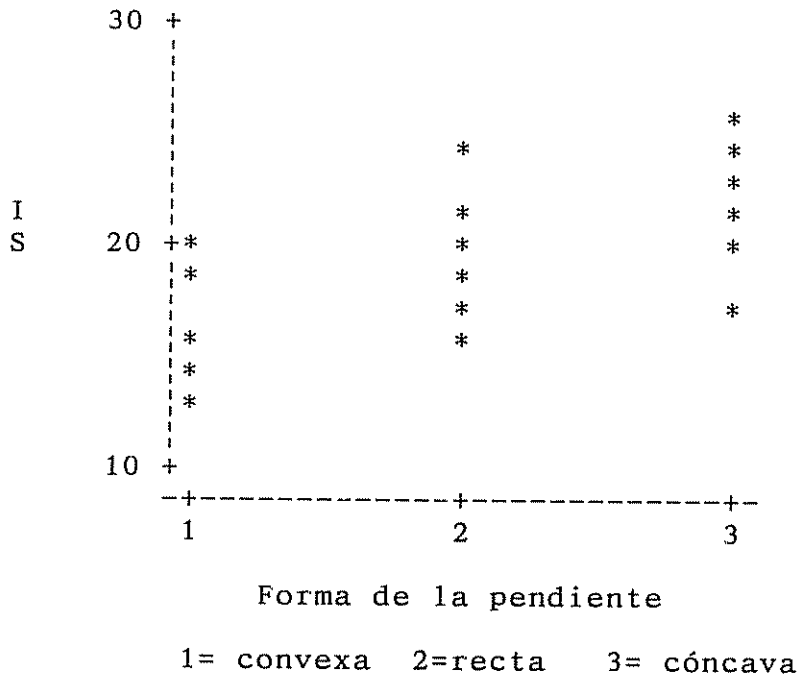


b) Posición en la Pendiente vrs IS (16 obs. ocultas)

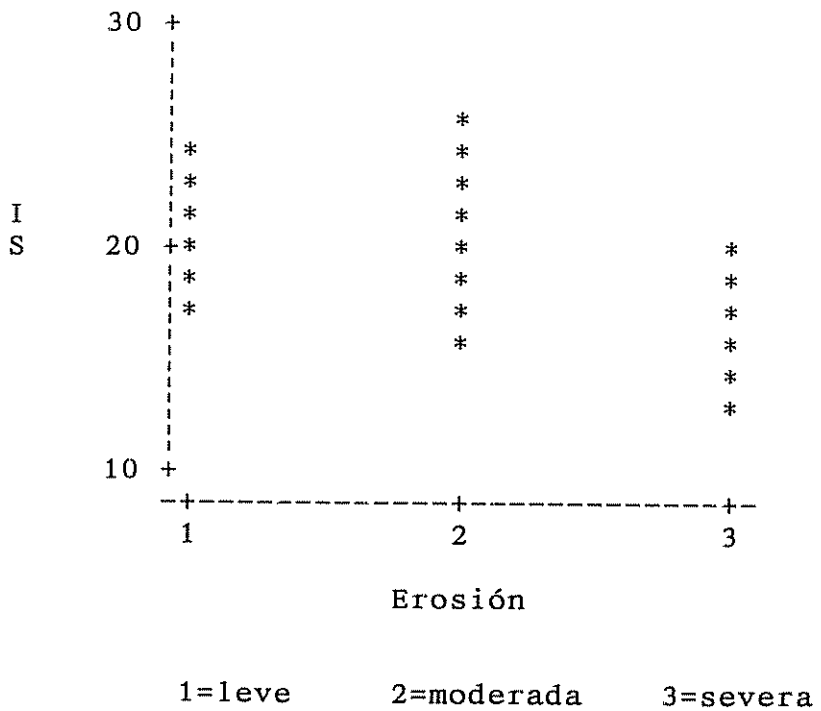


1= parte alta 2=parte media 3=parte baja

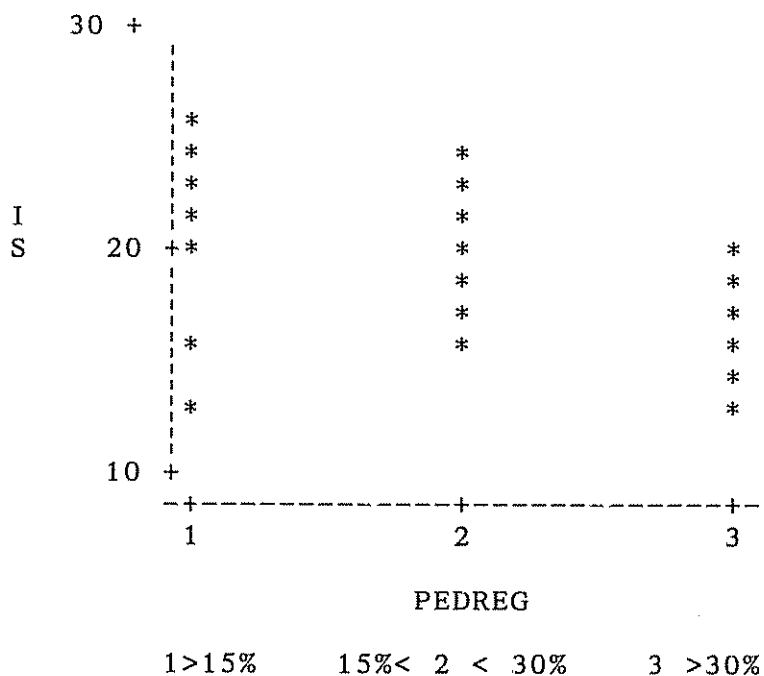
c) Forma de la pendiente vrs IS (21 obs ocultas)



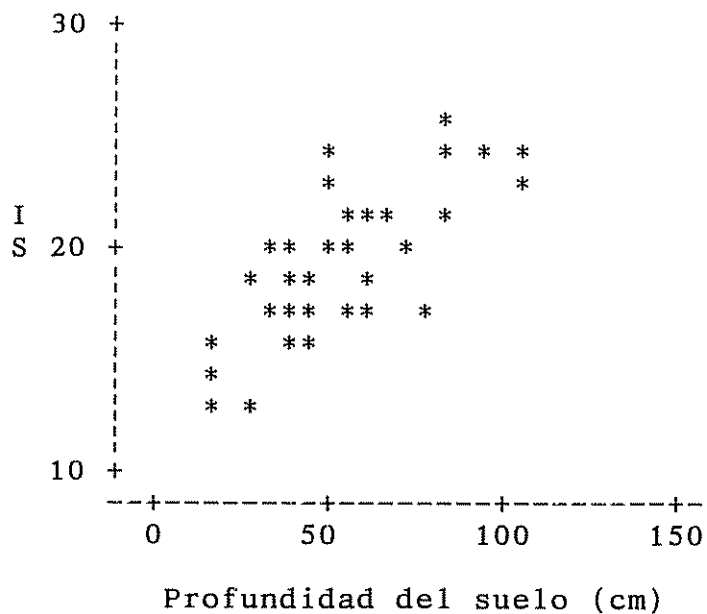
d) Erosión vrs IS (18 obs. ocultas)



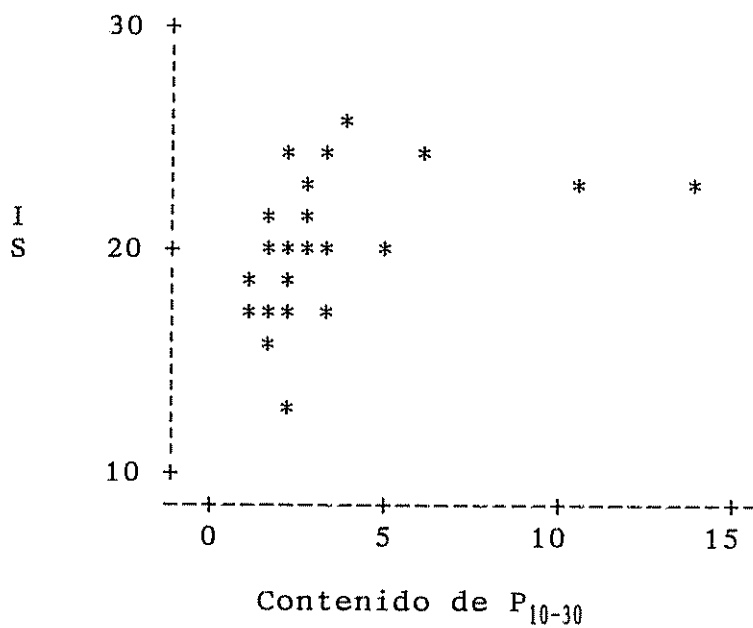
e) Pedregosidad superficial vrs IS (18 obs. ocultas)



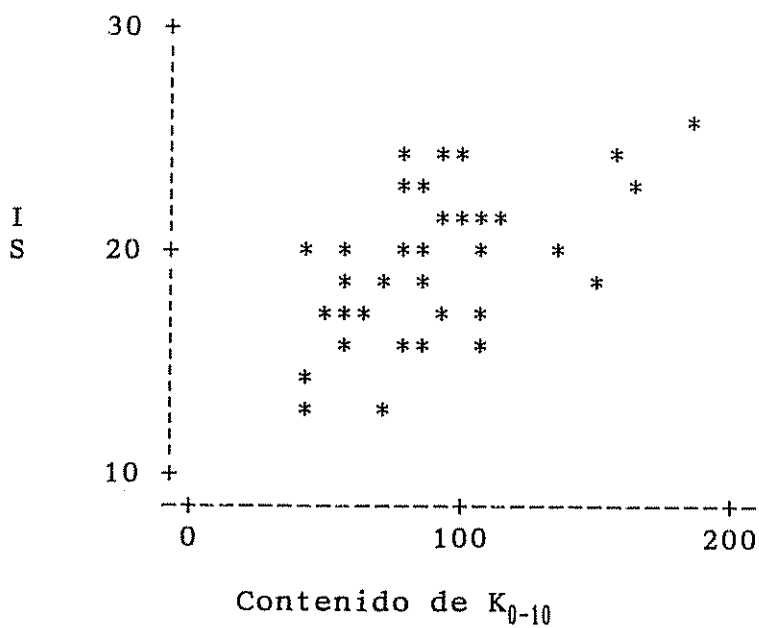
f) Profundidad del suelo vrs IS (6 obs. ocultas)



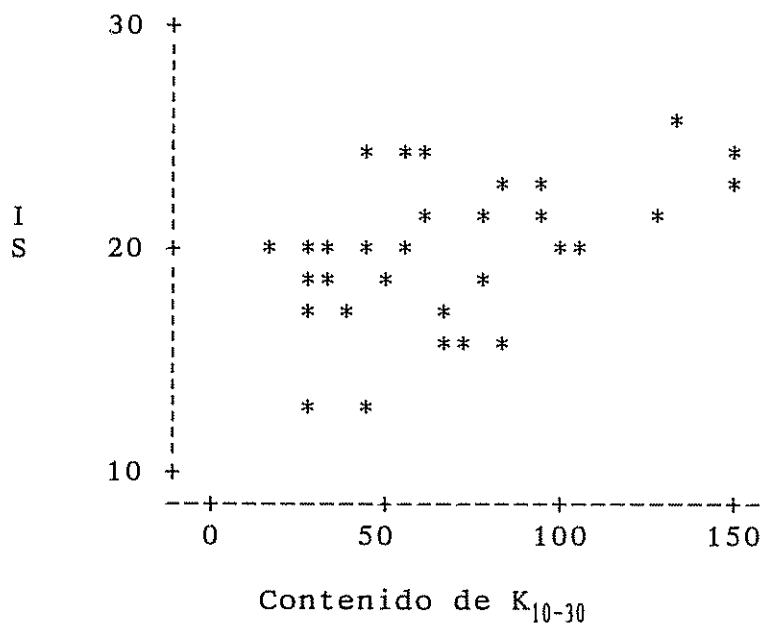
g) Contenido de P_{10-30} vrs IS (12 obs. ocultas)



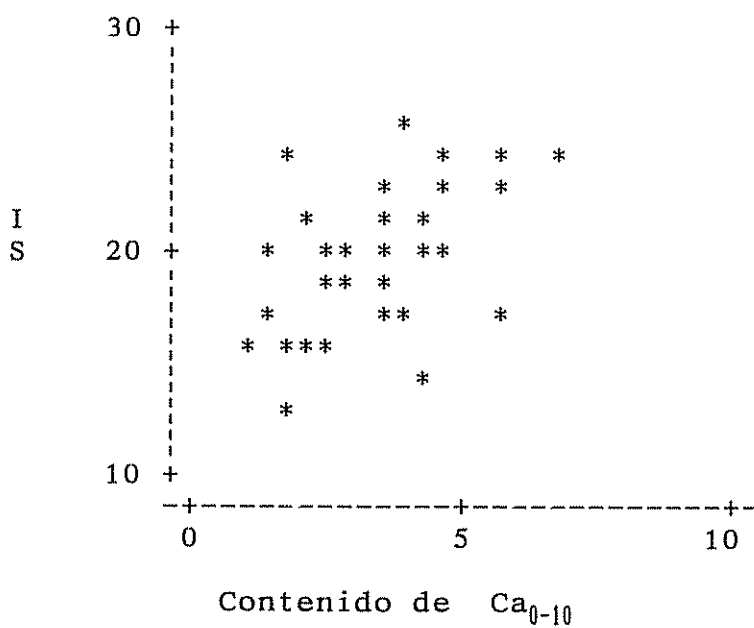
h) Contenido de K_{0-10} vrs IS (2 obs. ocultas)



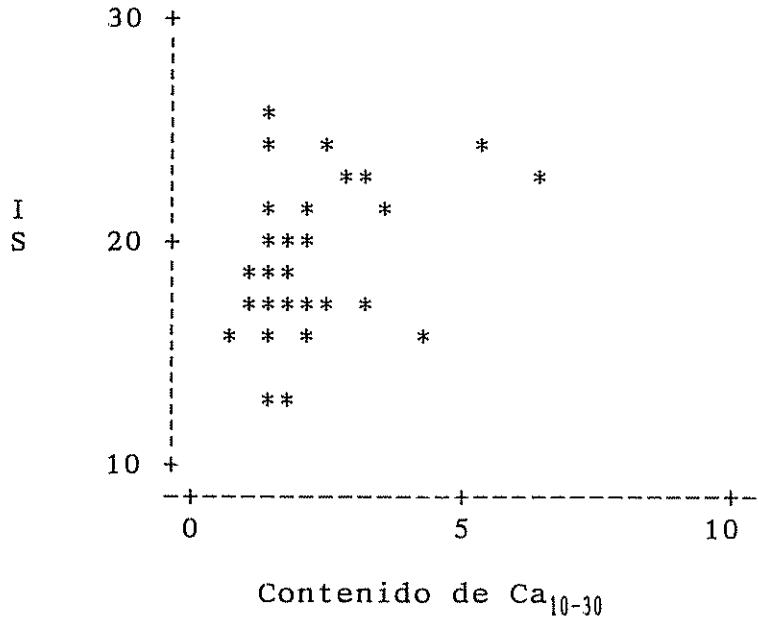
i) Contenido de K_{10-30} vrs IS (3 obs ocultas)



j) Contenido de Ca_{0-10} vrs IS (6 obs. ocultas)



k) Contenido de Ca_{10-30} vrs IS (7 obs. ocultas)



Anexo 5. Coeficientes de correlación entre las variables topográficas y edáficas que correlacionaron con el índice de sitio para *P. oocarpa*, con un nivel de $P < 0,05$

Variable	$r > 60$	$60 > r > 40$	$40 > r > 30$
Pendiente %	Erosion (0,62)	FormaP. (-0,53)	Prof. (-0,32) K ₀₋₁₀ (-0,33) K ₁₀₋₃₀ (-0,36)
Posición P.		FormaP. (0,48)	
Forma P.	Erosión(-0,68)	Prof. (0,60)	Pedre. (-0,40) P ₀₋₁₀ (0,41) Ca ₀₋₁₀ (0,32) MO ₀₋₁₀ (0,38) Ca ₁₀₋₃₀ (0,38) K ₁₀₋₃₀ (0,37)
Erosión		Prof. (-0,54)	
Pedregosidad		Prof. (-0,55)	Altitud(-0,33) K ₀₋₁₀ (-0,38)
Profundidad		K ₀₋₁₀ (0,47)	Altitud (0,39) Ca ₁₀₋₃₀ (0,35)
P ₁₀₋₃₀	P ₀₋₁₀ (0,78) Ca ₁₀₋₃₀ (0,63)	Ca ₀₋₁₀ (0,57) K ₁₀₋₃₀ (0,43)	K ₀₋₁₀ (0,38) Mn ₁₀₋₃₀ (0,36)
K ₀₋₁₀		K ₁₀₋₃₀ (0,55) Mg ₀₋₁₀ (-0,48) Mg ₁₀₋₃₀ (-0,52)	Cu ₀₋₁₀ (-0,32)
K ₁₀₋₃₀	Mg ₁₀₋₃₀ (0,50) Ca ₁₀₋₃₀ (0,57)	Mg ₀₋₁₀ (-0,41)	MO ₁₀₋₃₀ (0,37)
Ca ₁₀₋₃₀	MO ₀₋₁₀ (0,63)	Ca ₁₀₋₃₀ (0,47) pH ₀₋₁₀ (0,46) Arc. ₀₋₁₀ (0,44)	Mg ₀₋₁₀ (0,32) Fe ₀₋₁₀ (-0,38)

Anexo 6. Matriz de correlación entre los nutrientes foliares encontrados en *P. oocarpa*, en la Sierra de las Minas.

	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe
P	1.000	0.52 **	0.39 *	-0.05 ns	0.04 ns	0.16 ns	-0.16 ns
K		1.000	-0.03 ns	-0.44 **	0.07 ns	0.20 ns	-0.14 ns
Ca			1.0000	0.33 *	-0.21 ns	0.19 ns	-0.21 ns
Mg				1.0000	-0.32 *	0.21 ns	-0.21 ns
Cu					1.0000	-0.13 ns	0.54 **
Zn						1.000	-0.04 ns
Fe							1.000

ns = no significativo

** = altamente significativo $P < 0.01$

* = significativo $P < 0.05$

Anexo 7. Métodos de laboratorio utilizados para el análisis de las muestras de suelo y de tejido vegetal.

1. Métodos de análisis de suelo

- ◆ pH: en agua solución 2,5:1 agua-suelo, utilizando potenciómetro.
- ◆ Fósforo, potasio, calcio y magnesio: se analizaron los disponibles utilizando una solución extractora Mchich I, doble ácido, método Carolina del Norte.
- ◆ Cobre, zinc, hierro y manganeso: solución extractora Mchich I, Carolina del Norte.
- ◆ Acidez extractable (Al+H): solución de KCl 1N.
- ◆ Materia orgánica: digestión húmeda con dicromato de potasio 1M.
- ◆ Textura: hidrómetro de Bouyucos
- ◆ El fósforo se determinó por colorimetría y el potasio, calcio, magnesio, cobre, zinc, hierro y manganeso, por absorción atómica en el espectrofotómetro.

2. Metodos de análisis de tejido vegetal

Las muestras de tejido vegetal, fueron digeridas en húmedo con un peso de 0,5 gr, para obtener un volumen final de 25ml, recuperado con HCl 1N. Se determinaron los siguientes elementos:

- a) Potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro y zinc, las cuales fueron determinados por absorción atómica en el espectrofotómetro.
- a) El fósforo se determinó por colorimetría.