



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

INDICE DE SITIO PARA *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, EN
SU ÁREA DE DISTRIBUCIÓN NATURAL EN LOS ESTADOS DE
VERACRUZ Y PUEBLA, MEXICO.

TESIS QUE PRESENTA
MELCHOR RODRIGUEZ ACOSTA

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO
DE:

MAESTRO EN CIENCIAS
FORESTALES

Chapingo, Estado de México.
2004



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



INDICE DE SITIO PARA *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, EN SU ÁREA
DE DISTRIBUCIÓN NATURAL EN LOS ESTADOS DE VERACRUZ Y
PUEBLA, MEXICO.

Tesis realizada por **Melchor Rodríguez Acosta** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:

A handwritten signature in dark ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to be 'Baldeamar Arteaga Martínez'.

DR. BALDEMAR ARTEAGA MARTÍNEZ

ASESOR:

A handwritten signature in dark ink, featuring a large, prominent loop. The signature is enclosed within a large, hand-drawn oval.

DR. CARLOS CÁNTORA GONZÁLEZ

ASESOR:

A handwritten signature in dark ink, featuring a large, prominent loop. The signature is enclosed within a large, hand-drawn oval.

DR. JOSÉ ISIDRO MELCHOR MARROQUÍN

El presente trabajo recibió apoyo financiero parcial en alguna de sus etapas por parte de la Comisión Nacional Forestal. Las actividades desarrolladas forman parte del proyecto "Determinación de los atributos poblacionales y de la productividad de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural de Veracruz y Puebla"

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor nació el día 15 de febrero de 1970 en el ejido Benjamín Urías, Municipio de Villa Hidalgo, Durango. Su instrucción escolar primaria la realizó en la escuela "Justo Sierra" ubicada en la localidad de su nacimiento durante el periodo de 1976 a 1982. Posteriormente, su formación media la recibió en la Escuela Secundaria Técnica no. 38, en la localidad vecina de ejido Revolución, Dgo. durante el periodo de 1982 a 1985. Inició sus estudios de Preparatoria en la Cd. De parral, Chih. en el ciclo escolar 1985-1986. Ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo en 1986, institución en la que cursó la preparatoria en los tres años posteriores y culminó su formación profesional en la División de Ciencias Forestales obteniendo el título en Ingeniería Forestal con orientación en Evaluación y Abastecimiento en el año de 1993.

Su experiencia profesional laboral inició en 1994. Durante un lapso de tres meses desarrolló actividades en el marco del Inventario Nacional Forestal Continuo de la región Norte del estado de Durango. Posteriormente, en agosto de 1994 ingresó al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), institución en la que, hasta la fecha, se ha desempeñado como investigador.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas instituciones y personas que colaboraron en el logro de este objetivo:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), institución que me ofreció la oportunidad de crecer profesionalmente.

A la Universidad Autónoma Chapingo porque me brindó la oportunidad de superarme académicamente

Al Dr. Baldemar Arteaga Martínez quien apoyó decididamente la realización del presente trabajo, por su colaboración y su aporte de experiencia invaluable.

Al Dr. Carlos Cíntora González por aceptar formar parte del comité asesor en el área estadística.

Al Dr. José Isidro Melchor Marroquín por revisar el presente trabajo y por su colaboración en la etapa de toma de datos.

Al Ing. José Octavio Romero quien proporcionó una fracción de los datos incluidos en esta tesis.

Al personal de SEMARNAT en los estados de Puebla y Veracruz quienes mostraron interés y colaboraron en las gestiones necesarias para obtener los permisos de aprovechamiento.

A los productores forestales: Cándido de Jesús, Don Crescenciano López, Manuel Grijalva, Isaac Castellanos, Guadalupe Chino y Rutilio Chino propietarios de los predios donde se obtuvieron las muestras de madera para hacer los análisis troncales.

A los trabajadores del Campo Experimental Ixtacuaco del INIFAP, quienes de alguna forma colaboraron en la realización de esta investigación.

Finalmente, un agradecimiento especial a mis hermanos Carlos y Felipe quienes facilitaron el vehículo que se utilizó durante la fase de toma de datos en campo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Esperanza y Antonio

Quienes forjaron en mí los valores y principios morales que hoy rigen mi existencia.

A MI ESPOSA E HIJOS:

Esperanza, Jesús Manuel, Aldo Hassan y David.

Por su apoyo incondicional durante mis constantes ausencias, esperando siempre el regreso de quien los ama.

A MIS HERMANOS:

Julio Antonio, Felipe, Lorena, Luís Carlos, Sonia y a sus familias respectivas.

Porque su actitud ante la vida me ha enseñado a valorar su existencia.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO Y AMIGOS:

De quienes guardo recuerdos felices.

CONTENIDO

Capítulo.	Página
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA.....	vi
CONTENIDO.....	vii
INDICE DE CUADROS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xii
SUMMARY.....	xiii
 1. INTRODUCCION.....	 1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Hipótesis y supuestos.....	3
2. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1 Antecedentes generales sobre la evaluación de la productividad del sitio forestal.....	 4
2.2. Concepto de sitio forestal.....	6
2.3. Métodos para evaluar la productividad del sitio forestal.....	7
2.4. Concepto de índice de sitio.....	8

2.5	Objetivo de la evaluación del índice de sitio.....	9
2.6	Fuentes de error en la estimación de índices de sitio.....	10
2.7	Tipos de familias de curvas de índice de sitio.....	13
2.8	Métodos de construcción de curvas de índice de sitio.....	14
	2.8.1. Método de la curva guía.....	15
	2.8.2. Método de la diferencia algebraica.....	16
	2.8.3. Método de la predicción de parámetros.....	18
2.9	Estado del conocimiento sobre índices de sitio en México.....	18
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1	Descripción del área de estudio.....	24
	3.1.1. Localización geográfica.....	24
	3.1.2. Taxonomía y distribución.....	25
	3.1.3. Vegetación.....	25
	3.1.4. Clima.....	26
	3.1.5. Suelos.....	27
3.2	Metodología.....	27
	3.2.1. Obtención de muestras en campo.....	27
	3.2.2. Análisis troncales.....	30
	3.2.2.1. Preparación de rodajas de madera.....	30
3.3	Análisis estadístico de los datos.....	33

3.3.1. Selección de modelos.....	33
3.3.2. Estructuración de la base de datos.....	34
3.3.3. Estimación de los modelos	35
3.3.4. Construcción de la familia de curvas de índice de sitio.....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1. Diagrama de dispersión general.....	38
4.2. Base de datos.....	39
4.3. Análisis de varianza de los modelos ajustados.....	40
4.3.1. Modelo poli-anamórfico con cambio continuo.....	40
4.3.2. Modelo poli-anamórfico con cambio discreto.....	40
4.3.3. Modelo de Schumacher.....	41
4.3.4. Modelo de Payandeh y Wang.....	41
4.3.5. Modelo de Weibull.....	42
4.3.6. Modelo de Chapman-Richards.....	42
4.4. Estadísticos indicadores del nivel de bondad de ajuste.....	43
4.5. Modelos seleccionados.....	45
4.5.1. Estimación de alturas dominantes de índice de sitio.....	54
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
6. LITERATURA CITADA.....	56

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Formato para el registro de datos provenientes de análisis troncales.....	32
2 Ecuaciones en diferencia de los modelos polimórficos utilizados.....	35
3 Estructura de la base de datos para la forma funcional de ecuaciones en diferencia.....	40
4 Análisis de varianza del modelo poli-anamórfico con cambio continuo.....	41
5 Análisis de varianza del modelo poli-anamórfico con cambio discreto.....	40
6 Análisis de varianza del modelo polimórfico de Schumacher.....	41
7 Análisis de varianza del modelo polimórfico de Payandeh y Wang.....	41
8 Análisis de varianza del modelo polimórfico de Weibull.....	42
9 Tabla de análisis de varianza del modelo polimórfico de Chapman-Richards.....	42
10 Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos probados.....	43
11 Parámetros estimados y estadísticos de ajuste para los modelos de <i>Pinus chiapensis</i> con datos de análisis troncales.....	44
12 Altura dominante estimada para <i>Pinus chiapensis</i> por clase de edad e índice de sitio.....	54

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Localización geográfica del área de estudio para determinar el índice de sitio para <i>Pinus chiapensis</i> (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Veracruz y Puebla.	24
2 Rodal coetáneo ubicado en el predio "Tepalcatipan", municipio de Tlatlauquitepec, Puebla.....	28
3 Obtención de rodajas de madera.....	29
4 Proceso de preparación de rodajas de madera.....	31
5 Medición de anillos de crecimiento.....	31
6 Representación gráfica del conjunto de pares de datos edad-altura de <i>Pinus chiapensis</i> (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Veracruz y Puebla.....	38
7 Evolución del conjunto de curvas de índice de sitio del modelo Payandeh y Wang conforme aumenta la edad base.....	48
8 Comparación del comportamiento de curvas polimórficas de los modelos de Chapman-Richards y Payandeh y Wang a una edad base de 25 años.....	49
9 Evolución del conjunto de curvas de índice de sitio del modelo de Schumacher conforme aumenta la edad base.....	51

RESUMEN

INDICE DE SITIO PARA *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, EN SU ÁREA DE DISTRIBUCIÓN NATURAL EN LOS ESTADOS DE VERACRUZ Y PUEBLA, MEXICO.

Melchor Rodríguez Acosta.

Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.

Marzo de 2004.

(Dirección del Dr. Baldemar Arteaga Martínez)

Se realizó una estimación del índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en bosque natural de los municipios de Atzalan, Veracruz, Tlatlauquitepec y Yaonáhuac, Puebla, México. La base de datos se generó con 31 árboles dominantes y codominantes utilizando la metodología de análisis troncal para obtener un total de 358 pares de datos edad-altura.

Los modelos exponenciales: poli-anamórfico con cambio continuo y poli-anamórfico con cambio discreto (Torres, 2001); Schumacher(1939); Payandeh y Wang(1994); Weibull; y Chapman-Richards(1959) fueron ajustados con procedimientos no lineales utilizando el sistema de análisis estadístico SAS y se compararon en sus versiones polimórficas utilizando el método de la diferencia algebraica. Los modelos de Chapman-Richards, Payandeh y Wang y Schumacher mostraron un ajuste aceptable obteniendo pseudo coeficientes de determinación de 0.983, 0.983 y 0.969 respectivamente. Se construyeron curvas polimórficas con los modelos seleccionados y se fijaron tres índices de sitio: 20, 25 y 30 a una edad base de 25 años.

Palabras-clave: modelos exponenciales, curvas polimórficas, diferencia algebraica, productividad del sitio, análisis troncales.

ABSTRACT

SITE INDEX FOR *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, IN ITS NATURAL DISTRIBUTION AREAS IN VERACRUZ AND PUEBLA STATES, MEXICO.

Melchor Rodríguez Acosta.

Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.

March of 2004.

(Under the direction of Dr. Baldemar Arteaga Martínez)

A site index estimation was carried out for *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, in natural forests in Atzalan, Veracruz State, and Tlatlauquitepec and Yaonáhuac, Puebla State, Mexico. The database was constructed using information from 31 dominant or codominant trees, using stem analysis methodology to obtain 358 height-age observations.

Exponential models: poly-anamorphic with continuous change and poly-anamorphic with discrete change (Torres, 2001); Schumacher (1939); Payandeh and Wang (1994); Weibull; and Chapman-Richards (1959) were fitted through non linear procedures using the SAS system and compared in their polymorphic versions using the algebraic difference method. The Chapman-Richards, Payandeh and Wang, and Schumacher models showed a suitable fitting, obtaining determination pseudo coefficients of 0.983, 0.983 and 0.969, respectively. Finally, polymorphic curves were constructed with the chosen models and three site indexes were established: 20, 25, and 30 with a base age of 25 years old.

Key-words: Exponential models, polymorphic curves, algebraic difference, site productivity, stem analysis.

1. INTRODUCCION

México se distingue por su amplia diversidad biológica y la gran cantidad de endemismos entre los cuales podemos citar a *Pinus chiapensis* (Martínez Andresen, anteriormente descrita como *P. strobus* var. *Chiapensis* (Martínez, 1945; citado por Martínez, 1998) cuya distribución natural en la república mexicana se restringe a los estados de Guerrero, Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla. Esta especie forma parte del bosque mesófilo de montaña, ecosistema sumamente disminuido en su extensión, composición y estructura debido principalmente al cambio de uso del suelo para actividades agrícolas y ganaderas. Actualmente se encuentran solo relictos conformados en poblaciones aisladas y en su mayoría árboles solitarios o en pequeños grupos diseminados a lo largo de toda la franja de su distribución natural. Esta condición la ubica como una especie que requiere protección especial (SEDESOL, 1994).

México posee más de 50 especies de coníferas (Martínez, 1992). La mayoría de estas se ubican en zonas de clima templado frío ocupando grandes extensiones en las cadenas montañosas. En contraparte, las especies que se han desarrollado en climas tropicales y subtropicales son escasas y su limitada distribución las sitúa en franca desventaja competitiva; *P. chiapensis*, no obstante que tiene alto potencial maderable, los aspectos de manejo que contribuyan a un aprovechamiento racional y sostenible durante su ciclo productivo, no han sido investigados de manera consistente.

Actualmente es considerada una de las coníferas de más rápido crecimiento en el mundo (Dvorak *et al.*, 2000). Las metodologías para estimar parámetros de productividad en bosques de coníferas han evolucionado de manera considerable. Baste mencionar el caso de los modelos de crecimiento para estimar índices de sitio, los cuales, en un inicio se implementaron mediante formas lineales simples hasta llegar a ecuaciones exponenciales complejas cuya interpretación difícil no deja de ser un impedimento para que su utilización práctica en el ámbito de manejo forestal se generalice. Las técnicas de estimación se han proyectado como herramientas importantes para el manejo adecuado de bosques y el uso de modelos para estimar la productividad de un bosque se ha situado como una acción relevante en el manejo silvícola contemplando un horizonte de planeación a largo plazo.

La productividad de un sitio se evalúa haciendo mediciones de las características de éste y de las variables del rodal, las cuales se usan como términos en funciones matemáticas o puntos para generar gráficas (Häglund, 1981; citado por Arteaga, 1985). Estas variables forman parte de modelos matemáticos con rangos de validación restringidos debido a las aproximaciones en su proceso de construcción. Estos rangos pueden ser amplios si los modelos son consistentes, coherentes y se diseñan con sumo cuidado (Dym e Ivery, 1980; citado por Ayerde, 1996).

1.1. Objetivos.

- 1). Determinar el modelo exponencial polimórfico que presente un mejor ajuste a la tendencia mostrada en el conjunto de observaciones de edad altura de la especie estudiada.
- 2). Estimar el índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en el área de distribución natural de Veracruz y Puebla.

1.2. Hipótesis y supuestos.

Las formas polimórficas exponenciales para estimar el índice de sitio mediante el método de la diferencia algebraica ajustan de manera aceptable la tendencia general de las observaciones edad-altura de la especie *Pinus chiapensis*, bajo el supuesto de que las localidades en donde se colectaron las muestras reúnen condiciones de suelo, clima y relieve representativas del área de estudio considerada.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Antecedentes generales sobre la evaluación de la productividad del sitio forestal.

Jones (1969), citado por Arteaga (1985) indica que la primer familia de curvas de índice de sitio fue construida en Alemania en 1824. Posteriormente, los trabajos de Johnson (1914) se desarrollaron en Escandinavia y los de Sterre (1914) en los Estados Unidos de Norteamérica.

En diversas áreas científicas como la silvicultura, biología, sociología y economía se han desarrollado un gran número de formas de expresar el crecimiento con una fórmula matemática. Una de las razones que motivan lo anterior es la adecuada planeación a largo plazo que la silvicultura requiere con información confiable acerca del rendimiento y crecimiento de las masas forestales (Prodan, 1968; citado por Bojorges, 2000). El desarrollo de un árbol está ligado de manera estrecha a los anillos de crecimiento, los cuales forman círculos concéntricos en torno al eje del fuste del árbol y pueden observarse claramente empleando metodologías específicas.

La medición y conteo de anillos en la sección transversal del fuste del árbol para determinar la edad y crecimiento de los árboles y bosques fue practicada primeramente por Marcelo Malpighi. Cada anillo de crecimiento presenta una coloración clara con células de mayor tamaño, las cuales se desarrollan durante

la primavera y el verano y una coloración oscura con células más angostas, las cuales se desarrollan durante el otoño; durante el invierno, el crecimiento de estos anillos es pequeño o nulo, debido a la limitada actividad vital que presentan los árboles(Villa, 1975).

En algunas coníferas es difícil identificarlos, tal es el caso de las especies que habitan en zonas tropicales donde no existen diferencias climáticas notables a lo largo de las estaciones del año, por lo que no se podrán formar anillos anuales, ya que estos corresponderán a lapsos diferentes al de un año. De manera general, las coníferas presentan anillos anuales, sin embargo, Villa (1975) menciona que en Chihuahua, ha encontrado pinos que han desarrollado dos anillos de crecimiento en un año y en las partes húmedas y bajas de Chiapas y Oaxaca, en dos años no se ha producido un anillo completo.

La facilidad del conteo de anillos depende de la especie y las condiciones ambientales bajo las que el árbol está creciendo. Especies de coníferas de rápido crecimiento en zonas templadas del norte usualmente se les cuentan los anillos de manera fácil. Se tienen dificultades cuando existe poco contraste entre madera de primavera y madera de verano como es el caso con especies de porosidad difusa y de latifoliadas deciduas. El crecimiento de los árboles bajo condiciones ambientales adversas puede producir anillos muy angostos o no existentes que son difíciles de contar excepto en virutas lijadas o rodajas. Una catástrofe tal como sequías prolongadas o defoliación por insectos, seguida de condiciones de crecimiento favorable puede generar "falsos anillos".

Estos muestran una circunferencia incompleta que puede distinguirse únicamente en rodajas. En algunas regiones del mundo (Australia, Nueva Zelanda) y en otros países de zonas tropicales o templadas del hemisferio sur, el crecimiento del árbol no es caracterizado generalmente por anillos anuales. Generalmente, no existen anillos anuales en coníferas tropicales y en especies de porosidad difusa y de latifoliadas siempre verdes a menos que estén creciendo en condiciones alpinas o subalpinas (Avery y Burkhardt, 1983).

2.2. Concepto de sitio forestal.

La Sociedad Americana de Forestales (SAF) define el término “sitio” como un área considerada en términos de su ambiente, particularmente determinado por el tipo y calidad de la vegetación que el área soporta. Puede ser clasificado cualitativamente en tipos de sitio por su clima, suelo y vegetación o cuantitativamente en clases de sitio por su potencial para producir madera (Avery y Burkhardt, 1983). Arteaga (1985) menciona que el sitio forestal -en primer lugar- lleva inmersa una connotación de localización geográfica y segundo, involucra en su significado la totalidad de las condiciones del ambiente (factores bióticos, edáficos y climáticos) que existen en una localidad particular.

Una estimación de la producción potencial de madera de un sitio para una especie en particular o para un tipo de bosque, se puede considerar como una medida de la productividad potencial del terreno forestal. A esta medida se le ha

dado el nombre generalizado de calidad de estación. Dentro de un cierto microclima, la calidad de estación refleja la productividad del sitio forestal, entendido éste como la integración de todos los factores bióticos y abióticos que influyen en el crecimiento del arbolado en ese sitio en particular (Torres y Magaña, 2001). Este concepto involucra la suma de muchos factores ambientales: profundidad del suelo, textura, estructura, composición mineral, pendiente del terreno, exposición, especies que viven en este y el microclima, entre otros (Daniel *et al.*, 1982; citado por Arteaga, 1985).

2.3. Métodos para evaluar la productividad del sitio forestal.

Clutter *et al.* (1983) señalan que existen dos métodos para evaluar la calidad de sitio: los métodos directos que toman como medida de evaluación la variable más representativa del objetivo de producción: área basal, volumen y los métodos indirectos que relacionan las características del rodal con la variable más representativa del objetivo de producción.

La determinación directa de la calidad por el volumen presente no es una práctica aplicable cuando se tiene un número grande de rodales o parcelas. En 1875, el forestal austriaco Fr. Von Baur dedujo de sus experiencias que existe una notable correlación entre la calidad y la altura media de los árboles en un rodal, inició con esto la investigación cuyo objeto fue encontrar la dimensión del árbol que proporcione una expresión numérica de la calidad del sitio. Encontró una correlación negativa entre densidad y crecimiento en diámetro, lo mismo

ocurre con el volumen, pero el crecimiento en altura no se conduce en el mismo sentido, ya que existiendo una densidad media este crecimiento es aproximadamente el mismo, deduciendo con esto, que el crecimiento en altura es utilizable como "índice de calidad". Aceptado este criterio, la ventaja en crecimiento deberá persistir durante toda la vida de los árboles y, por consiguiente, se ha de reflejar en la altura total de aquellos árboles que resulten menos afectados en su crecimiento por agentes o accidentes perturbadores y por la competencia vital. Estos árboles son los dominantes y codominantes (Mackay, 1964).

De todas las medidas indirectas obtenidas del sitio, la altura del árbol en relación con la edad ha sido la más práctica, consistente y útil. Esta medida es llamada índice de sitio. En teoría, el crecimiento en altura es sensible a las diferencias en calidad de sitio, es poco afectada por la variación de la densidad y composición de especies, es relativamente estable bajo la variación de intensidades de corta (Avery y Burkhart, 1983; Clutter *et al.*, 1983).

2.4. Concepto de índice de sitio.

Una medida comúnmente aceptada para estimar la productividad de los bosques es el índice de sitio (Trimble y Weitzman, 1956; Clutter *et al.*, 1983; Avery y Burkhart, 1983). En años recientes, los índices de sitio se han convertido en el método más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Torres, 2001). Consiste en evaluar la altura que lograrían

los árboles dominantes o codominantes y sanos a una edad determinada, frecuentemente referida como edad base (Payandeh y Wang, 1994). Tal evaluación requiere la adopción de un modelo que represente la relación edad-altura; así como de la creación de una familia de curvas generadas con el mismo modelo (Torres, 2001).

2.5. Objetivo de la evaluación del índice de sitio.

Los propósitos de la evaluación del sitio son: a). Identificar la productividad potencial presente y futura de los sitios forestales y b). Proveer un conjunto de referencias para el diagnóstico y prescripción del manejo de tierras (Avery y Burkhart, 1983). Sin embargo, el verdadero objetivo al aplicar el procedimiento de estimación del índice de sitio es predecir el rendimiento de acuerdo al patrón de crecimiento en altura que un rodal seguirá durante el resto de su vida. Pensar que el objetivo es la predicción de la altura del rodal a la edad índice resulta insignificante (Clutter *et al.*, 1983).

Además de que la calificación de los diferentes índices de sitio nos servirá para determinar las series de ordenación forestal sostenible dentro de todo lo que es el manejo forestal sustentable de los bosques.

Para muchas especies, las áreas con buena calidad de sitio son también áreas con tasas altas de crecimiento en altura. Para estas especies, el volumen

potencial y el crecimiento en altura están correlacionados positivamente(Clutter *et al.*, 1983; Avery y Burkhart, 1983).

Las personas que se encargan del manejo de recursos forestales maderables usan el índice de sitio para estimar el potencial productivo del sitio forestal porque es el método más simple, fácil de aplicar y exacto cuando las curvas de índice de sitio son confiables (Graney y Burkhart, 1973). Sin embargo, una gran desventaja del uso de curvas para medir la productividad es que el índice de sitio puede ser determinado con exactitud únicamente de árboles creciendo en sitios coetáneos con densidad normal (considerando la completa utilización del espacio). El crecimiento en altura de árboles creciendo en espacios abiertos o árboles creciendo bajo condiciones de supresión pueden reflejar la influencia de espaciamientos y densidad (sombreado) más que la productividad básica del sitio. Además, los sitios deben reflejar el impacto total de los factores del medioambiente en que crecen(Trimble y Weitzman, 1956).

2.6. Fuentes de error en la estimación de índices de sitio.

Un aspecto importante en el establecimiento de índices de sitio, es cómo seleccionar los árboles muestra para obtener la información de las variables edad-altura. La práctica americana usualmente involucra la selección aleatoria seguida por medidas de estos árboles(Clutter *et al.*, 1983). Los árboles dominantes o codominantes son ideales para considerarlos como muestra debido a que representan el componente más estable y son el indicador más

confiable de la productividad del sitio o rodal (Alexander, 1967). No obstante, Spurr y Barnes (1982); citados por Arteaga (1985) consideran que los árboles dominantes y codominantes no expresan con precisión la capacidad productiva del sitio, debido a que los criterios para seleccionarlos pueden diferir; los árboles dominantes pueden desaparecer del primer estrato y nunca serán medidos; las cortas no autorizadas y otros impactos pueden modificar la altura promedio de los árboles dominantes y codominantes del rodal, sin cambiar la capacidad productiva real del rodal y por último es difícil medir con precisión hasta la punta del árbol. Los criterios para seleccionarlos difieren entre diversos autores, citados por Arteaga (1985): Häglund (1981) menciona que la variable altura media es reemplazada por la altura dominante, definida como el promedio de la altura de los árboles dominantes de un rodal; en tanto, Barret (1978) define la altura dominante como la altura del árbol más alto en una parcela de 1/5 de acre. Más (1970) menciona que en Europa, se toma un promedio de las alturas de los 100 árboles más grandes por acre o por hectárea. Beekhuis (1966) citado por Clutter *et al.* (1983) define la altura media predominante, como la altura promedio de los 40 árboles más grandes por acre. En Norteamérica, es común seleccionar al azar árboles dominantes y codominantes seguido por la medición de altura total y edad en tres de los ejemplares seleccionados (Arteaga, 1985).

Los factores que contribuyen en la precisión para estimar el índice de sitio son considerados por Häglund (1981), Clutter *et al.*, (1983) citados por Arteaga (1985); errores de muestreo, cuando la muestra en una parcela se generaliza a

toda la población; errores al azar y sistemáticos en el cambio de altura de los árboles dominantes y diferencias al azar y sistemáticas entre la actual altura dominante y las curvas de índice de sitio causadas por el uso de expresiones analíticas no apropiadas. Se reconocen como fuentes de error a la elección de una muestra sesgada: las clases de edad jóvenes contienen una preponderancia de sitios buenos y clases de edades más grandes se ubican en sitios pobres; esta situación subestima el índice de sitio en edades jóvenes y sobreestima en rodales maduros o viejos; el segundo error es considerar que la forma de las curvas de crecimiento en altura es la misma para todos los sitios y un tercer error se relaciona con el uso inadecuado de las curvas de índice de sitio(Beck y Trousdell, 1973).

En la metodología de análisis troncal es importante estimar con precisión la altura a la cual el crecimiento anual ha culminado dentro de una sección del fuste; la disminución de esta fuente de error es posible con el método TARG (tree annual radial growth) propuesto por Kariuki (2002). Las curvas de edad-altura basadas sobre parámetros estimados por el método TARG tuvieron más exactitud en la estimación de alturas en intervalos muestrales de 1.5 y 3 m que los métodos de Carmean's (1972), Lenhart's (1972) Newberry (1978) y Fabbio *et al.* (1994).

2.7. Tipos de familias de curvas de índice de sitio.

Un conjunto de curvas de índice de sitio es una familia de patrones de desarrollo con calificativos cualitativos como buena, mediana y pobre o números como I, II, III, IV y V o bien 35, 30, 25, 20 y 15 asociados con las curvas para propósitos de referencia. El método de referencia más común usa la altura alcanzada a alguna edad de referencia especificada. Clutter *et al.*, (1983) reconocen dos tipos de familias de curvas de índice de sitio: anamórficas y polimórficas. Las primeras se caracterizan por que la altura mantiene la misma proporción a diferentes edades, por lo que las curvas aparentan tener la misma forma. Por el contrario, en las curvas polimórficas la proporción que guarda la altura es diferente entre curvas, y por tanto, éstas aparentan diferente forma en cualquiera de sus dos variantes: polimórficas articuladas y no articuladas (Torres, 2001).

Desde que se inició el uso de los índices de sitio se generó polémica entre el uso de curvas anamórficas y polimórficas. A la fecha nadie puede argumentar sobre la superioridad real de alguna de ellas, dado que su uso prácticamente depende de la especie en cuestión (Payandeh, 1977; Hahn y Carmean, 1982; citados por Torres, 2001) detectándose que algunas ventajas de un tipo de curva se convierten en desventajas para el otro tipo y viceversa. Se ha planteado la hipótesis de que la integración de variaciones tanto en forma como en escala de las curvas podría dar por resultado un tipo de curva que mezcle las ventajas de ambas. Así, se ha señalado que las curvas anamórficas

asemejan el comportamiento teórico esperado de curvas de índice de sitio; sin embargo, en años recientes se ha descubierto que varias especies presentan el tipo de curva polimórfico en su relación edad-altura (Newnham, 1988; Ker y Bowling, 1991; Stansfield *et al.*, 1991; Goelz y Burk, 1992; Payandeh y Wang, 1994; citados por Torres, 2001).

Considerando esta nueva variante, Torres (2001) propone la construcción de curvas compuestas, es decir, curvas ana-polimórficas y poli-anamórficas. Tienen parámetros de forma y escala variables, que integran propiedades de ambos tipos: anamórficas y polimórficas con la intención de mejorar las predicciones de altura del rodal en relación a la productividad forestal.

2.8. Métodos de construcción de curvas de índice de sitio.

En sus inicios, las curvas de índice de sitio se construyeron utilizando pares de datos edad-altura ordenados en una gráfica sobre la que se trazaba una curva promedio y paulatinamente fueron reemplazados por métodos numéricos incluyendo modelos matemáticos con la finalidad de aumentar la precisión de las estimaciones. La fuente de datos provenía de parcelas temporales de muestreo y en la actualidad se recomienda utilizar parcelas permanentes en las que se pueden realizar remediciones a través del tiempo o bien, provienen de análisis troncales lo cual representa con mayor fidelidad el patrón de crecimiento de las especies al considerar una serie de medidas edad-altura en todo el fuste del árbol.

Bailey y Clutter (1974) presentan una propuesta, la cual únicamente requiere los datos edad-altura en clases de sitio únicos, pero no necesariamente mutuamente excluyentes. Sobre el supuesto de que existe una relación lineal entre el logaritmo de altura y la edad a una potencia negativa, derivaron una técnica de estimación, la cual no requiere mínimos cuadrados no-lineales iterativos.

Todo conjunto de curvas de índice de sitio se han derivado usando procedimientos estadísticos de ajuste de curvas utilizando tres métodos de construcción de funciones de índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983):

1. **Método de la curva guía.**
2. **Método de la diferencia algebraica.**
3. **Método de la predicción de parámetros.**

2.8.1. Método de la curva guía.

Este es usado para generar funciones de tipo anamórfico y utiliza información proveniente de sitios temporales de muestreo. La derivación del modelo es simple y para ejemplificarlo considere el modelo de Richards (1959):

$$A = \beta_1 (1 - e^{\beta_2 E})^{\beta_3} \dots\dots\dots (1)$$

donde:

A = altura (m)

E = edad (años)

β_1 = parámetro de escala

β_2, β_3 = parámetros que definen la forma.

Una vez ajustado el modelo se genera la función de índice de sitio (IS). Si se desea generar curvas de tipo anamórfico, el parámetro de escala será variable; se despeja de la ecuación anterior y se obtiene: $\beta_1 = A(1 - e^{\beta_2 E})^{-\beta_3}$ El índice de sitio se considera que está en la misma trayectoria que el modelo y para este caso está definido a la edad base. Por lo que: $IS = \beta_1(1 - e^{\beta_2 E_b})^{\beta_3}$ y sustituyendo β_1 en IS se obtiene la función anamórfica: $IS = A\left(\frac{1 - e^{\beta_2 E_b}}{1 - e^{\beta_2 E}}\right)^{\beta_3}$ Usualmente, el estimador de β_2 debe ser negativo, aunque para plantaciones jóvenes se pueden tener valores positivos (Torres y Magaña, 2001).

La sustitución de los parámetros β_1, β_2 y β_3 origina la llamada “curva guía” la cual es una “curva promedio” de los datos muestrales usados. Posteriormente se desarrollan curvas individuales edad-altura proporcionales a la curva guía y son referenciadas a una edad índice etiquetando cada línea con la altura obtenida a la edad de referencia. Por definición, cuando $E = E_b$, A debe ser igual al índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

2.8.2. Método de la diferencia algebraica.

También es llamado método de ecuaciones en diferencia (Clutter *et al.*, 1983). Requiere datos de parcelas permanentes de muestreo o de análisis troncal y su

utilidad radica en que pueden construirse familias de curvas de ambos tipos: anamórficas y polimórficas, hecho que lo sitúa como un método versátil.

El primer paso es la elección de un modelo de crecimiento que se desea ajustar. Los más utilizados son el de Schumacher, Richards y Weibull. Posteriormente se define el tipo de familia de curvas que se desea construir. Después se hace la forma de ecuación en diferencia derivada del modelo elegido y se procede a realizar el procedimiento de ajuste a través de métodos no lineales, ya que la mayor parte de los modelos de ecuaciones en diferencia tienden a ser modelos exponenciales. Algunos autores recomiendan la linealización del modelo o la combinación de variables. Sin embargo, se recomienda que los modelos sean ajustados a través de procedimientos no lineales (Torres y Magaña, 2001).

Para ejemplificar el método asuma que se ha elegido el modelo Richards

$A = \beta_1 (1 - e^{\beta_2 E})^{\beta_3}$ y se desean curvas polimórficas por lo que se elige que varíe el

parámetro β_2 y se despeja $\beta_2 = \frac{1}{E} \ln \left[1 - \left(\frac{A}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\beta_3}} \right]$ y se substituye en

$IS = \beta_1 (1 - e^{\beta_2 E_b})^{\beta_3}$. Asumiendo que IS es la altura A_2 y la edad base (E_b) es la

segunda edad (E_2) se tendrá el siguiente modelo de ecuación en diferencias:

$$A_2 = \beta_1 (1 - e^{b E_2})^{\beta_3} \text{ donde } b = \frac{1}{E_1} \ln \left[1 - \left(\frac{A_1}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\beta_3}} \right] \dots\dots\dots (2.2)$$

2.8.3. Método de la predicción de parámetros.

Los pasos necesarios para llevar a cabo este método según Moreno (1996) son: 1). Ajuste de modelos y cálculo de un índice de sitio a cada árbol y sitio en forma individual, 2). Encontrar las relaciones funcionales entre parámetros e índice de sitio obtenidos, 3). Sustituir las funciones obtenidas en 2). En el modelo original para obtener las expresiones reparametrizadas del mismo y proceder a su ajuste final.

Es utilizado para generar funciones polimórficas de índice de sitio con curvas que se intersectan. Es menos útil que los otros métodos debido a dos inconvenientes: a). La familia de curvas generadas, usualmente no pasa por el valor de índice de sitio al cual supuestamente corresponde y b). la elección de la edad base tiene efecto directo en la determinación de la familia de curvas (Torres y Magaña, 2001).

2.9. Estado del conocimiento sobre índices de sitio en México.

En México existe una gran cantidad de trabajos realizados sobre este tema, Arteaga (1985) realizó una recopilación de éstos y hace una breve descripción de los estudios realizados hasta el año de 1984. Menciona que Castaños (1962) fue el primero en ocuparse del tema al analizar dos metodologías para determinar "índices de localidad" para *Pinus patula* en el Norte de Oaxaca.

Posteriormente siguieron los trabajos de Cárdenas (1970), Mas (1970), Garzón (1976), Musálem (1977), Kiessling (1978, 1981), Ramírez (1978), Breach (1979), Mas (1978, 1979), Rodríguez (1980), Orantes (1980, 1981), Orantes y Musálem (1982), Aguilar (1982, 1983), Rodríguez (1982), Rosales *et al.* (1982), Maldonado (1983), Arteaga y Rodríguez (1983), Maldonado (1984), Aguirre (1984), Orantes (1984) quienes han desarrollado metodologías, perfeccionado modelos de crecimiento para generar familias de curvas de índice de sitio. Entre las especies de coníferas, en su mayoría del género *Pinus* que han sido estudiadas se encuentran: *Pinus montezumae* Lamb., *P. patula* Schl. et Cham, *P. hartwegii* Lindl. *P. douglasiana* Martínez, *P. michoacana* Martínez, *P. oocarpa* Schiede, *P. lumholtzii* Rob. et Fern., *P. leiophylla* Benth, *P. arizónica* Engelm., *P. durangensis* Martínez, *P. engelmanni* Carr., *P. ayacahuite* Ehr., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. herrerae* Martínez, *P. lawsoni* Roetzl., *P. tenuifolia* Benth., *P. oaxacana* Mirov., y *Abies religiosa*. En todos estos trabajos resaltan la importancia de utilizar análisis troncales para crear la base de datos.

Benavides (1987) y Aguilar (1983) citados por Ayerde (1996), han usado el modelo Schumacher y quienes lo han comparado con el de Chapman-Richards en sus versiones anamórfica y polimórfica, son: Pérez, (1990), Bojorges (1990) y Landeros (1994). Comparado con Weibull, Gompertz y logístico resultó mejor el de Schumacher, usando datos provenientes de análisis troncales de *P. douglasiana* Martínez (Aguilar, 1994) y resultó mejor el polimórfico de Schumacher que el de Chapman-Richards y el Weibull en una comparación con

datos de análisis troncales de *P. douglasiana* Martínez y *P. lawsonii* Roetzl., realizada por Madrigal y Ramírez (1995) en Uruapan, Michoacán.

Por su importancia maderable en la Sierra Madre Oriental, *P. patula* Schl. et Cham., ha sido una de las especies más estudiadas. Arteaga (1985) construyó curvas polimórficas en la región Chignahuapan-Zacatlán, evaluó el ajuste de un modelo lineal y la ecuación de Richards modificada a través del procedimiento no lineal para edades obtenidas a través del análisis troncal e hizo una comparación con virutas de incremento obtenidas con taladro de Pressler. Concluye que el modelo lineal no presentó un ajuste adecuado al patrón de crecimiento en altura y el modelo no lineal si representa en forma satisfactoria la tendencia de la curva de crecimiento. Las mediciones provenientes de análisis troncales presentaron una menor suma de cuadrados residual que las provenientes de virutas de incremento. También correlacionó el índice de sitio con los principales factores encontrando que la profundidad del horizonte A, la altitud, y el porcentaje de pendiente tienen una fuerte relación con el crecimiento en altura de *Pinus patula*.

El modelo de Chapman-Richards en su formulación polimórfica fue usado por Acosta (1991) para estimar el índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. En el área del Campo Experimental Forestal "San Juan Tetla", Puebla. En el procedimiento de ajuste utilizó 1266 pares de observaciones edad-altura y mediante el método de la diferencia algebraica obtuvo los siguientes

parámetros: $A_2 = 42.617725 \left(1 - e^{-0.031214 E_2} \right)^{\left(\frac{\ln(A_1 / 42.617725)}{\ln(1 - e^{-0.031214 E_1})} \right)}$. Por su parte, Landeros (1994) utilizó el mismo modelo y lo comparó con el de Schumacher. Obtuvo los datos de análisis troncales de *Pinus durangensis* Martínez y *Pinus teocote* Schl. et Cham., en el estado de Durango. Los datos correspondientes a la primera especie se ajustaron con el modelo Chapman-Richards utilizando el método de la curva guía, mientras que para la segunda, el modelo de Chapman-Richards en su forma anamórfica y calculado a través de la diferencia algebraica resultó con mejor ajuste.

Una evaluación del crecimiento y productividad para *Pinus patula* en la región de Huayacocotla, Ver., fue realizada por Monroy (1997) quien estimó el índice de sitio utilizando una función de crecimiento no lineal que presenta componentes de los modelos de Richards (1959) y Payandeh (1974):

$$h = \beta_0 E^{\beta_1} \left(1 - e^{-\beta_2 E^{\frac{1-\beta_1}{\beta_2}}} \right).$$

Obtuvo los siguientes estimadores

$\beta_0 = 13.64413$, $\beta_1 = 0.1863527$, $\beta_2 = 0.1203072$ y $\beta_3 = 0.5686957$. Generó curvas para los índices de sitio de 18, 22, 26, 30 y 34 metros a una edad base de 40 años.

Los estudios recientes se han encaminado al uso de modelos con mayor número de parámetros de estimación, tal es el caso de Torres (2001) quien realizó análisis troncales con una muestra de 164 árboles de los cuales, 127 se usaron para el ajuste de modelos y 37 para la validación de resultados. El

muestreo fue selectivo y los análisis troncales se hicieron de acuerdo con la metodología definida por Kiessling (1978), mientras que la estimación de alturas derivada de tales análisis se hizo de acuerdo con el método ISSA (Fabbio et al., 1994).

Los modelos compuestos ana-polimórficos:

$$\mathbf{a).} \ln(IS) = \left\{ \frac{E_b}{2E_b - E} \right\} \left\{ \ln(h) + [b - E \ln(h) + [\ln(h) - a][E_b - E]] \left\{ \frac{1}{E_b} - \frac{1}{E} \right\} \right\}, \dots \quad (3)$$

$$\mathbf{b).} \ln(IS) = \left[\frac{E}{E_b} \right] \left[\ln(h) + \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E} \right) (b - aE_b - \ln(h)E + aE) \right], \dots \quad (4)$$

$$\text{y poli-anamórficos: } \mathbf{c).} \ln(IS) = \left[\frac{E_b}{E} - 1 \right] \left[a + \frac{b}{E^2} (E_b - E) \right] + \ln(h) \left[2 - \frac{E_b}{E} \right] \dots \quad (5)$$

$$\mathbf{d).} \ln(IS) = \left[\frac{E_b}{E} \right] \left[a - \ln(h) + b \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_b} \right) \right] + 2 \ln(h) - a + b \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E} \right) \dots \quad (6)$$

se compararon contra el modelo anamórfico de Schumacher (1939):

$$h_2 = \exp \left\{ \ln(h_1) + b \left[\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E} \right] \right\}, \dots \quad (7)$$

$$\text{polimórfico de Schumacher: } h_2 = \exp \left\{ a + [\ln(h) - a] \frac{E}{E_b} \right\}, \dots \quad (8)$$

$$\text{anamórfico de Richards (1959): } h_2 = h_1 \left[\frac{1 - e^{\beta_2 E_2}}{1 - e^{\beta_2 E_1}} \right]^{\beta_3}, \dots \quad (9)$$

$$\text{polimórfico de Richards: } h_2 = \beta_1 (1 - e^{bE_2})^{\beta_3} \dots \quad (2)$$

$$\text{donde: } b = E_1^{-1} \ln \left[1 - \left(\frac{h_1}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\beta_3}} \right].$$

También incluyó modelos polimórficos más eficientes de tres parámetros del modelo de Richards definidos por Goelz y Burk (1992):

$$h_2 = h_1 \frac{1 - \exp \left[-\beta_1 \left(\frac{h_1}{E_1} \right)^{\beta_2} E_1^{\beta_3} E_2 \right]^{\beta_4}}{1 - \exp \left[-\beta_1 \left(\frac{h_1}{E_1} \right)^{\beta_2} E_1^{\beta_3} E_1 \right]} \dots\dots\dots (10)$$

y el modelo polimórfico de Payandeh y Wang (1994): $h_2 = \beta_1 h_1^{\beta_2} (1 - e^{-\beta_3 E_2})^v$.. (11)

donde $v = \frac{\ln \left(\frac{h_1}{\beta_1 h_1^{\beta_2}} \right)}{\ln(1 - e^{-\beta_3 E_1})}$

Los resultados indican que las formas poli-anamórficas predicen eficientemente índices de sitio cuando las diferencias de edad son pequeñas (menos de 20 años), mientras que las formas ana-polimórficas son eficientes sólo si la diferencia de edad es mayor.

Sánchez y del Castillo (2001) realizaron un estudio en rodales naturales en la localidad de “El Rincón” Oaxaca, México en el que determinaron la calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, a través de métodos indirectos utilizando regresión lineal. El muestreo fue selectivo y obtuvieron pares de datos edad-altura de 210 árboles dominantes y codominantes distribuidos en 44 sitios temporales de muestreo. Derivaron tres calidades de estación: rica, mediana y pobre con valores de índice de sitio de 35.5, 29.7, y 24.2 m respectivamente considerando una edad base de 50 años.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción del área de estudio.

3.1.1. Localización geográfica.

El estudio se desarrolló en el municipio de Atzalan, Veracruz y en el estado de Puebla se incluyeron los municipios de Tlatlauquitepec y Yaonáhuac.

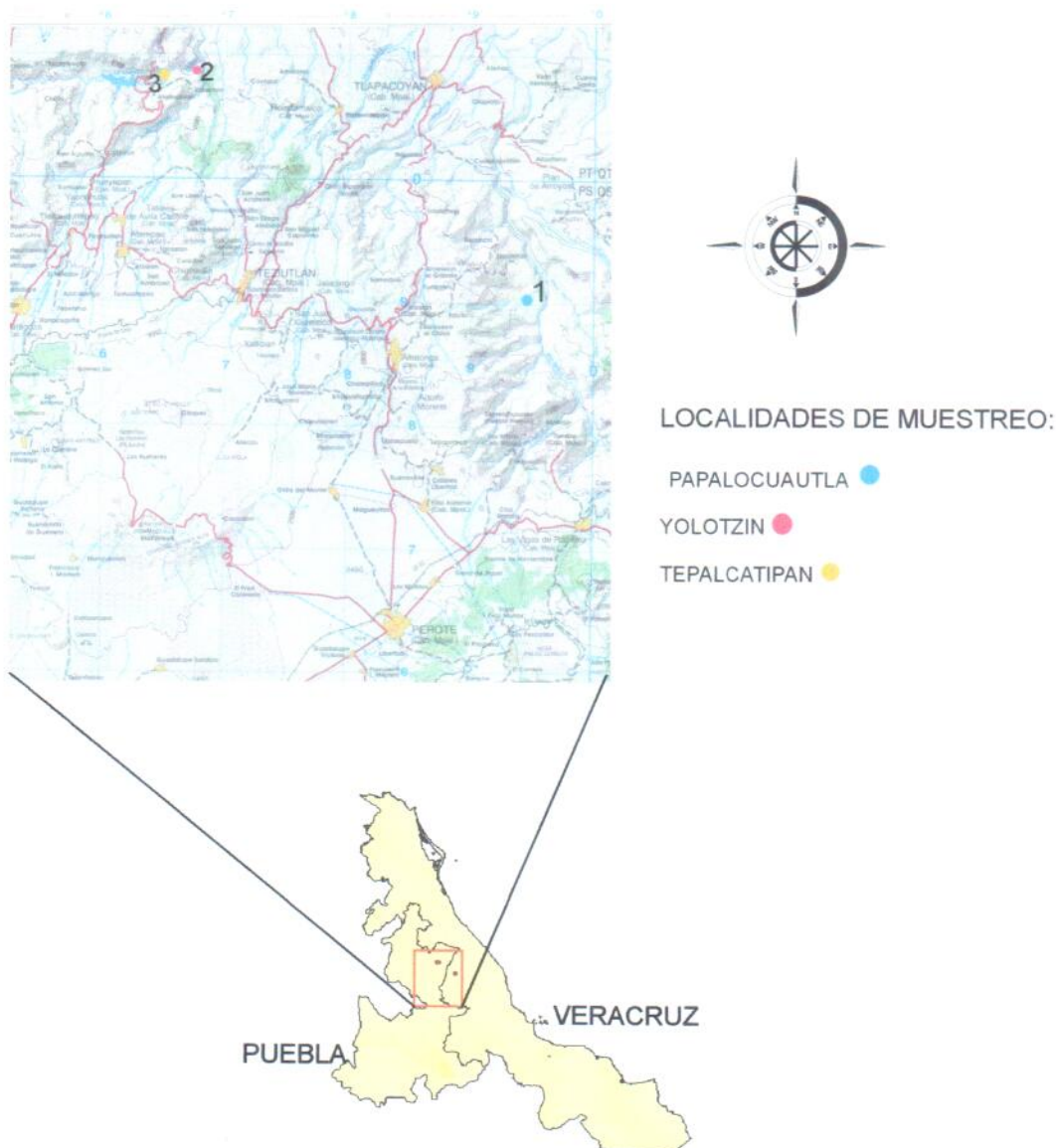


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio para determinar el índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Veracruz y Puebla.

3.1.2. Taxonomía y distribución.

La especie fue identificada originalmente por el botánico mexicano Maximino Martínez en 1940 como *Pinus strobus* var. *chiapensis*. Después, estudios taxonómicos hechos por Gaussen (1960), Andresen (1964) y Andresen (1966), citado por Hernández (1986) recomendaron que se reclasificara como *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Eguiluz (1988) menciona que esta especie se distribuye en los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. En tanto que en Guatemala se limita a los estados de Huehuetenango y Quiché (Aguilar, 1953). El rango altitudinal es de 150 m a 2300 m en latitudes de 15 a 19°N (Donahue *et al.*, 1991; citado por Wright *et al.*, 1996).

Pinus chiapensis habita generalmente en laderas de cerros, filos de serranías, cañadas, zonas rocosas y escasamente en terrenos de poca pendiente; aunque cuando se encuentran sobre lomas, las pendientes son muy suaves.

3.1.3. Vegetación.

En Puebla se encuentra asociado con *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Liquidambar styraciflua*, *Ostrya* sp. y *Platanus* sp. en suelos profundos, con buen drenaje, a 600 msnm. (Rzedowski y Vela, 1966; citado por Hernández, 1986). Madrigal (1967), citado por Téllez (1999) lo encontró asociado con *Pinus teocote* Schl. et Cham., *P. pseudostrobus* Lindl. y *Quercus* spp. Mientras que cerca de Tlapacoyan, Veracruz se le encontró asociado con *Platanus mexicana* y *Ulmus*

mexicana en la zona de transición entre el bosque caducifolio y selva mediana subperennifolia (Del Castillo, Acosta y Sánchez, 1995; citados por Téllez, 1999). En la región bajo estudio localizada en los estados de Puebla y Veracruz, el nombre común que recibe esta especie es “acalocote”.

3.1.4. Clima.

Pinus chiapensis se encuentra bajo la influencia de un clima cálido-húmedo o templado-cálido (Andresen, 1966; citado por Téllez, 1999); está confinada a localidades subtropicales y tropicales.

La precipitación promedio anual en el área de distribución es de 1000 a 2500 mm; esta se distribuye desde abril a noviembre , siendo agosto el mes más lluvioso y los meses del invierno, los más secos (Eguiluz, 1978; citado por Téllez, 1999). La temperatura promedio anual oscila entre 17 y 23°C (Loock, 1950; Rzedowski y Vela, 1966; Zamora y Velasco, 1977; Weeb, 1983; Dvorak y Brouard, 1986; citados por Téllez, 1999). Las temperaturas extremas rara vez bajan a 0°C y las máximas están alrededor de los 35°C; siendo poco variable la temperatura media anual (Eguiluz, 1978; citado por Hernández, 1986). Normalmente se presentan más de 220 días nublados al año, a diferencia de 140 días con sol. Al parecer, esta especie no tolera las heladas (Eguiluz, 1978; Dvorak y Donahue, 1973; Del Castillo et al., 1995; citados por Téllez, 1999).

3.1.5. Suelos.

En las poblaciones del estado de Veracruz y Puebla, se desarrolla sobre suelos arcillosos, profundos y con buen drenaje, mientras que en Oaxaca y Guerrero son suelos areno-arcillosos , menos profundos y de buen drenaje. (Eguiluz, 1978; citado por Téllez, 1999). Sin embargo, en los recorridos terrestres realizados se observa que la textura del suelo es areno-arcillosa en las localidades estudiadas de Atzalan, Ver. y Tlatlauquitepec, Pue. Los suelos donde habita *Pinus chiapensis* tienen buen drenaje y son areno-limosos y arcillo-areno-limosos, con un pH de 4.5 a 5.5 y con profundidades mayores a 1 m. La capacidad de intercambio catiónico es elevada y los niveles de saturación de bases varían de 41 a 100% (Donahue, Dvorak y Gutiérrez, 1991; citados por Téllez, 1999).

3.2. Metodología.

3.2.1. Obtención de muestras en campo.

Como primera fase del estudio se realizaron recorridos terrestres en el área de distribución natural de los estados de Veracruz y Puebla. Se ubicaron geográficamente aquellos rodales que presentaron características ideales para realizar el estudio. Fueron seleccionados rodales coetáneos (Figura 2.) con densidad uniforme en los que se ubicaron al menos dos árboles dominantes o

codominantes sin evidencia de daños, libre de plagas y enfermedades, sin bifurcaciones en el fuste.



Figura 2. Rodal coetáneo ubicado en el predio “Tepalcatipan”, municipio de Tlatlauquitepec, Puebla.

Dado que la especie *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen se encuentra en un status legal definido como “sujeta a protección especial” bajo la norma oficial mexicana (NOM-059-ECOL/94), que determina las especies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas, raras, endémicas, amenazadas, en peligro de extinción y las sujetas a protección especial fue necesario tramitar el permiso correspondiente ante la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) –previa autorización del dueño– para derribar los árboles seleccionados.

Los árboles dominantes o codominantes seleccionados se derribaron y seccionaron para obtener rodajas de 5 cm de espesor a diferentes alturas (Fig. 3.A) según lo especifica la metodología para la realización de análisis troncales

propuesta por Mas (1970) y Kiessling(1978). Las rodajas fueron enumeradas en la parte inferior utilizando pintura en aerosol y considerando un orden progresivo desde la altura del tocón hasta la punta del árbol seccionando cada 2.55 m (medida comercial). Los discos de madera fueron agrupados por árbol (Fig. 3.B) y se trasladaron a las instalaciones del Campo Experimental Ixtacuaco ubicado en el Km. 4.5 de la carretera Martínez de la Torre-Tlapacoyan, Veracruz.



Figura 3. Obtención de rodajas de madera. A. Árbol dominante seccionado en medidas comerciales de 2.55 m de longitud. B. Conjunto de rodajas ordenadas progresivamente.

3.2.2. Análisis troncales.

3.2.2.1. Preparación de rodajas de madera.

Las rodajas fueron estibadas en el interior de una casa para disminuir el contenido de humedad de manera paulatina y evitar con esto rajaduras excesivas. Este proceso de secado resultó ser muy lento por lo que fue necesario secarlas al aire libre (Figura 4.A) con la finalidad de preparar la superficie sometiéndola a un proceso de pulido utilizando una máquina lijadora industrial (Figura 4.B). Se utilizaron dos sustancias: diesel y aceite para impregnar la superficie lijada con la intención de resaltar los anillos de crecimiento (Figura 4.C). El aceite para motor logró contrastar los anillos de manera más notoria; el diesel pierde nitidez en unas cuantas horas, esto representa una desventaja en el caso de que sea necesario realizar remediciones. Esta práctica facilita la visualización de la circunferencia completa, permitiendo así la detección de anillos falsos. (Figura 4. D).

Como se observa en la Figura 5.A se trazaron dos ejes perpendiculares en la superficie sobre el cual se realizan los conteos de anillos para obtener la edad del árbol a la altura en la que fue extraída la rodaja. En estos ejes se delimitan los periodos de crecimiento utilizando alfileres con cabeza de color (Figura 5.B). En este caso se establecieron mediciones de diámetro sin corteza cada cinco años usando una regla de acrílico graduada en milímetros y se obtuvo un promedio de los dos ejes. El formato utilizado para la recopilación de los datos e ilustra en el Cuadro 1.



Figura 4. Proceso de preparación de rodajas de madera. A. Secado al aire libre, B. Pulido de superficie, C. Contraste de anillos de crecimiento, D. Visualización de la circunferencia completa del anillo.



Figura 5. Medición de anillos de crecimiento. A. Trazo de ejes perpendiculares, B. Delimitación de periodos de crecimiento.

3.3. Análisis estadístico de los datos.

Los pares de datos edad-altura obtenidos de 31 análisis troncales se ordenaron en cada árbol y se graficaron en un diagrama de dispersión general para observar la tendencia del conjunto de los datos y detectar puntos de influencia, es decir, aquellos datos que se encuentran aislados representando posibles errores en la medición o que están fuera de rango.

3.3.1. Selección de modelos.

La literatura reporta una gran cantidad de modelos lineales y no lineales de tipo anamórfico, polimórfico y compuestos (ana-polimórficos y poli-anamórficos) utilizados en la construcción de curvas de índice de sitio (Aguirre, 1984; Arteaga, 1985; Acosta, 1991; Payandeh y Wang, 1994; Zepeda *et al.*, 1990; Moreno, 1996; Monroy, 1997; Bojorges, 2000 y Torres, 2001, entre otros). Los modelos no lineales han demostrado tener niveles de ajuste superiores a los lineales. Es importante considerar que el patrón de desarrollo del crecimiento en altura sigue un curso similar a una curva en forma de "S" (Klepac, 1976), es decir, de tipo "sigmoidal", por lo que deben ajustarse modelos de tipo exponencial a través de procedimientos no lineales. Lo anterior es confirmado por Torres y Magaña (2001) mencionando que la mayoría de los modelos de ecuaciones en diferencia tienden a ser modelos no lineales. Aunque algunos autores recomiendan linealizar tales modelos a fin de simplificar el procedimiento de estimación, en general se recomienda estimar el modelo no

lineal usando técnicas propias para esta clase de modelos, es decir técnicas de regresión no lineal. En el Cuadro 2 se presentan los modelos estudiados.

3.3.2. Estructuración de la base de datos.

Las ecuaciones en diferencia requieren de dos medidas de edad (E_1 , E_2) y dos medidas de altura (A_1 , A_2) para cada observación. Es obvio que los pares de datos edad-altura originales deben tener una estructura en la que se tengan 4 variables. Se asume que la primera medición correspondiente a la primera rodaja (tocón) constituye el par de datos (E_1 , A_1) y la sección siguiente (primera troza) corresponde a (E_2 , A_2) admitiendo esta última como una remediación de altura en edad futura. Bajo esta lógica, la primera medición se combina con todas las remediciones posteriores hasta concluir en el ápice del árbol.

De esta forma, la información se enriquece, dado que se pueden estimar las trayectorias de altura bajo diferentes intervalos. Otra ventaja de esta estrategia es que permite adicionar información para intervalos de proyección grandes de índice de sitio, con lo que es posible detectar polimorfismos en las trayectorias, algo que no es posible cuando se utilizan intervalos pequeños (Torres y Magaña, 2001).

Cuadro 2. Ecuaciones en diferencia de los modelos polimórficos utilizados.

	Modelo	Ecuación en diferencia
5	Poli-anamórfico con cambio continuo ^Φ	$\ln(JS) = \left[\frac{E_b}{E} - 1 \right] \left[a + \frac{b}{E^2} (E_b - E) \right] + \ln(h) \left[2 - \frac{E_b}{E} \right]$ $A_2 = \exp \left\{ \left[\frac{E_2}{E_1} - 1 \right] \left[a + \frac{b}{E_1^2} (E_2 - E_1) \right] + \ln(A_1) \left[2 - \frac{E_2}{E_1} \right] \right\}$
6	Poli-anamórfico con cambio discreto ^Φ	$\ln(JS) = \left[\frac{E_b}{E} \right] \left[a - \ln(h) + b \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_b} \right) \right] + 2 \ln(h) - a + b \left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E} \right)$ $A_2 = \exp \left\{ \left[\frac{E_2}{E_1} \right] \left[a - \ln(A_1) + b \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \right] + 2 \ln(A_1) - a + b \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \right\}$
8	Polimórfico de Schumacher(1939) ^Φ	$A_2 = \exp \left\{ a + \left[\ln(A_1) - a \right] \frac{E}{E_b} \right\}$
11	Polimórfico de Payandeh y Wang (1994) ^Ψ	$A_2 = \beta_1 A_1^{\beta_2} (1 - \exp(-\beta_3 E_2))^v$ $v = \frac{\ln \left(\frac{A_1}{\beta_1 A_1^{\beta_2}} \right)}{\ln(1 - \exp(-\beta_3 E_1))}$
12	Polimórfico de Weibull ^Ω	$A_2 = \beta_1 \left[1 - \left(1 - \frac{A_1}{\beta_1} \right)^{\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\beta_3}} \right]$
13	Polimórfico de Chapman-Richards (1959) ^ω	$H_2 = \beta_1 \left(1 - e^{-\beta_2 E^2} \right)^{\left(\frac{\ln \left(\frac{H_1}{\beta_1} \right)}{\ln(1 - e^{-\beta_2 E_1^2})} \right)}$

Fuente: ^Φ Torres, 2001; ^Ψ Payandeh y Wang, 1994; ^Ω Torres y Magaña, 2001; ^ω Moreno, 1996.

3.3.3. Estimación de los modelos.

Los modelos se estimaron utilizando el procedimiento NLIN (regresión no lineal) de SAS (Statistical Analysis System v. 8.0) mediante el método de Gauss-Newton por lo que fue necesario obtener las derivadas parciales de cada uno

de los parámetros del modelo. Se eligieron los modelos mejor ajustados considerando lo siguiente: numéricamente, la tabla de análisis de varianza (ANVA) refleja un mayor ajuste del modelo si se obtiene un pseudo coeficiente de determinación (r^2) mayor, un cuadrado medio de los residuales (CMR) menor, una menor suma de cuadrados de los residuales (SCR), intervalos de confianza (IC) menores.

Aún cuando los valores numéricos anteriores sean aceptables, las funciones de crecimiento respectivas pueden representar de manera errónea la tendencia del conjunto de datos, por lo que es necesario graficar las ecuaciones seleccionadas y determinar si se adaptan al patrón de crecimiento de la muestra seleccionada.

3.3.4. Construcción de la familia de curvas de índice de sitio.

De acuerdo a la metodología propuesta por Clutter *et al.*, (1983), Avery y Burkhart (1983), el método de construcción de curvas formando ecuaciones en diferencia (Torres y Magaña, 2001) genera una ecuación en la que la altura 2 (A_2) o remediación 2 está expresada en función de la altura inicial (A_1) a una edad inicial (E_1) y una edad final (E_2). Por definición, si E_2 es igual a E_b , entonces A_2 es igual al índice de sitio (IS). De tal manera, considerando el modelo polimórfico de Payandeh y Wang (1994): $A_2 = \beta_1 A_1^{\beta_2} (1 - \exp(-\beta_3 E_2))^v$

donde $v = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{\beta_1 A_1^{\beta_2}}\right)}{\ln(1 - \exp(-\beta_3 E_1))}$, el índice de sitio puede estimarse colocando IS en lugar de A_2 y substituyendo E_2 por la E_b .

Una manera de fijar la amplitud de las etiquetas del IS es atendiendo a la amplitud dada por la muestra a la edad base fijada. Para *P. chiapensis*, especie de rápido crecimiento se fijaron tres etiquetas a la edad base de 25 años: 20, 25 y 30. Así, queda establecido que para generar la curva correspondiente a el IS de 20 se substituye este valor en A_2 , E_b es igual a 25 y la edad inicial E_1 se hace variar en el intervalo de edades deseado. Al despejar la variable A_1 , esta corresponderá a la altura inicial estimada a partir de un valor de edad inicial considerando una edad base predeterminada y un IS estimado según la productividad del sitio.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Diagrama de dispersión general.

En la base de datos constituida por 31 análisis troncales se presentó menor número de observaciones a partir de la edad de 55 años . La edad máxima registrada en los árboles fue de 115 años, sin embargo, el intervalo de edad de 55 a 115 años no tuvo representatividad muestral suficiente y para evitar sesgos se eliminaron estas observaciones, así mismo, se detectaron aquellos puntos de influencia, es decir , aquellas observaciones que se encuentran muy aisladas del conjunto total y se eliminaron. Finalmente, se utilizaron 358 pares de datos edad-altura que se muestran gráficamente en la Figura 6.

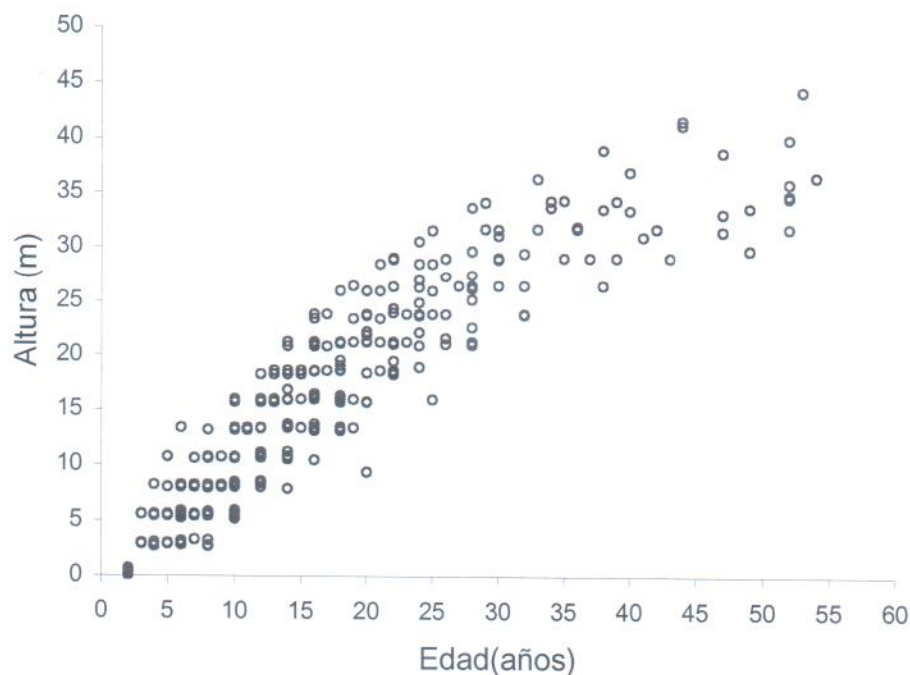


Figura 6. Representación gráfica del conjunto de pares de datos edad-altura de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Veracruz y Puebla.

4.2. Base de datos.

Tal como lo indica la estrategia para estructurar la base de datos, se generaron 1994 observaciones con cuatro variables. El Cuadro 1 muestra observaciones reales del árbol 1 de la base de datos utilizada.

Cuadro 3. Estructura de la base da datos para la forma funcional de ecuaciones en diferencia.

Identificador del árbol	Numero de observación	E1	A1	E2	A2
1	1	2	0.36	5	2.97
1	2	2	0.36	7	5.58
1	.	.	.	.	.
1	12	2	0.36	56	32.67
1	13	5	2.97	7	5.58
1	.	.	.	.	.
1	.	5	2.97	56	32.67
1	24	7	5.58	10	8.19
1	.	.	.	.	.
1	.	7	5.58	56	32.67
1	34	10	8.19	12	10.8
1	.	.	.	.	.
1	.	10	8.19	56	32.67
1	43	12	10.8	12	13.41
1	.	.	.	.	.
1	.	12	10.8	56	32.67
1	51	12	13.41	13	16.02
1	.	.	.	.	.
1	.	12	13.41	56	32.67
1	58	13	16.02	15	18.63
1	.	.	.	.	.
1	.	13	16.02	56	32.67
1	64	15	18.63	21	21.24
1	.	.	.	.	.
1	.	15	18.63	56	32.67
1	69	21	21.24	26	23.85
1	.	.	.	.	.
1	.	21	21.24	56	32.67
1	73	26	23.85	32	26.46
1	.	.	.	.	.
1	.	26	23.85	56	32.67
1	76	32	26.46	39	29.07
1	.	.	.	.	.
1	78	39	29.07	56	32.67

Nota: ^{E1} Edad inicial, ^{A1} Altura inicial ^{E2} Edad final ^{A2} Altura final

4.3. Análisis de varianza de los modelos ajustados.

4.3.1. Modelo poli-anamórfico con cambio continuo (Torres, 2001).

Cuadro 4. Análisis de varianza del modelo poli-anamórfico con cambio continuo (Torres, 2001).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	2	770509	385255	1913.69	<.0001
Residual	1992	401020	201.3		
Total no corregido	1994	1171529			
Total Corregido	1993	167888			

Parámetro	Estimado	Error estándar Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	3.5594	0.0259	3.5086	3.6102
B2	-3.8834	0.1021	-4.0837	-3.6831

Matriz de correlación Aprox.			
	B1	B2	
B1	1.0000000	-0.8869207	
B2	-0.8869207	1.0000000	

4.3.2. Modelo poli-anamórfico con cambio discreto(Torres, 2001).

Cuadro 5. Análisis de varianza del modelo poli-anamórfico con cambio discreto(Torres, 2001).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	2	766056	383028	1881.73	<.0001
Residual	1992	405473	203.6		
Total no corregido	1994	1171529			
Total corregido	1993	167888			

Parámetro	Estimado	Error estándar Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	4.1920	0.0292	4.1348	4.2492
B2	-23.8025	0.3837	-24.5550	-23.0500

Matriz de correlación Aprox.			
	B1	B2	
B1	1.0000000	-0.9280714	
B2	-0.9280714	1.0000000	

4.3.3. Modelo polimórfico de Schumacher(1939).

Cuadro 6. Análisis de varianza del modelo polimórfico de Schumacher(1939).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	1	1135993	1135993	63711.6	<.0001
Residual	1993	35535.7	17.8302		
Total no corregido	1994	1171529			
Total corregido	1993	167888			

Error estándar				
Parámetro	Estimado	Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	3.7384	0.00627	3.7261	3.7507

Matriz de correlación Aprox.				
	B1			
B1	1.0000000			

4.3.4. Modelo polimórfico de Payandeh y Wang(1994).

Cuadro 7. Análisis de varianza del modelo polimórfico de Payandeh y Wang(1994).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	3	1151058	383686	37318.2	<.0001
Residual	1991	20470.4	10.2815		
Total no corregido	1994	1171529			
Total corregido	1993	167888			

Error estándar				
Parámetro	Estimado	Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	37.0354	0.4856	36.0831	37.9877
B2	-0.00088	0.00362	-0.00798	0.00623
B3	0.0753	0.00163	0.0721	0.0785

Matriz de correlación Aprox.				
	B1	B2	B3	
B1	1.0000000	-0.8341989	-0.8592487	
B2	-0.8341989	1.0000000	0.5814109	
B3	-0.8592487	0.5814109	1.0000000	

4.3.5 Modelo polimórfico de Weibull.

Cuadro 8. Análisis de varianza del modelo polimórfico de Weibull.

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	2	1087858	543929	28770.2	<.0001
Residual	1961	37074.6	18.9060		
Total no corregido	1963	1124933			
Total corregido	1962	159274			

Parámetro	Estimado	Error estándar Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	31.5159	0.2009	31.1219	31.9099
B3	1.9092	0.0121	1.8854	1.9329

Matriz de correlación Aprox.			
	B1	B3	
B1	1.0000000	-0.4267250	
B3	-0.4267250	1.0000000	

4.3.6. Modelo polimórfico de Chapman-Richards(1959).

Cuadro 9. Tabla de análisis de varianza del modelo polimórfico de Chapman-Richards(1959).

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr>F Aprox.
Regresión	2	1151058	575529	56003.8	<.0001
Residual	1992	20471.0	10.2766		
Total no corregido	1994	1171529			
Total corregido	1993	167888			

Parámetro	Estimado	Error estándar Aprox.	Límites de confianza al 95%	
B1	36.9361	0.2666	36.4133	37.4588
B2	0.0755	0.00133	0.0729	0.0782

Matriz de correlación Aprox.			
	B1	B2	
B1	1.0000000	-0.8337373	
B2	-0.8337373	1.0000000	

4.4. Estadísticos indicadores del nivel de bondad de ajuste.

Se obtuvo un concentrado de indicadores resultantes de los análisis de varianza (Cuadro 10) y un conjunto de estimadores de los parámetros con el error estándar, intervalos de confianza y coeficientes de correlación obtenidos para cada modelo (Cuadro 11). El valor del pseudo r^2 corresponde al cociente entre la suma de cuadrados debida a la regresión y la suma de cuadrados total no corregida.

Cuadro 10. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos probados.

Modelo	INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE				
	A	B	C	D	E
5	770509	1171529	0.658	201.3	401020
6	766056	1171529	0.654	203.6	405473
8	1135993	1171529	0.969	17.830	35535.7
11	1151058	1171529	0.983	10.2815	20470.4
12	1087858	1124933	0.967	18.906	37074.6
13	1151058	1171529	0.983	10.276	20471.0

Nota: ^A suma de cuadrados de la regresión, ^B suma de cuadrados total no corregida, ^C pseudo - r^2 , ^D cuadrado medio de los residuales, ^E suma de cuadrados de los residuales.

Cuadro 11. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste para los modelos de *Pinus chiapensis* con datos de análisis troncales.

Modelo	Parámetros estimados		A	b	c	Coeficiente de correlación		
						$\hat{B}_1 - \hat{B}_2$	$\hat{B}_1 - \hat{B}_3$	$\hat{B}_2 - \hat{B}_3$
5	$\hat{B}_1$	3.5594	0.0259	3.5086	3.6102	-0.887		
	$\hat{B}_2$	-3.8834	0.1021	-4.0837	-3.6831			
6	$\hat{B}_1$	4.1920	0.0292	4.1348	4.2492	-0.928		
	$\hat{B}_2$	-23.802	0.3837	-24.555	-23.050			
8	$\hat{B}_1$	3.7384	0.00627	3.7261	3.7507	1.000		
11	$\hat{B}_1$	37.0354	0.4856	36.0831	37.9877	-0.834	-0.859	0.581
	$\hat{B}_2$	-0.0008	0.00362	-0.0079	0.00623			
	$\hat{B}_3$	0.0753	0.00163	0.0721	0.0785			
12	$\hat{B}_1$	31.5129	0.2009	31.1219	31.9099	-0.427		
	$\hat{B}_3$	1.9092	0.0121	1.8854	1.9329			
13	$\hat{B}_1$	36.9361	0.2666	36.4133	37.4588	-0.834		
	$\hat{B}_2$	0.0755	0.00133	0.0729	0.0782			

Nota: ^a error estándar, ^b límite inferior, ^c límite superior del intervalo de confianza al 95%.

4.5. Modelos seleccionados.

El valor del estadístico pseudo- r^2 es un criterio que se usa para la selección entre modelos candidatos. Se observa en el Cuadro 10 que los modelos de Chapman-Richards(1959) y el de Payandeh y Wang (1994) muestran eficiencia numérica muy semejante y ligeramente superior al resto de los modelos. Tienen un mayor pseudo r^2 . Ambos modelos tienen una estructura similar y el componente: $A_1^{\beta_2}$, presente en el modelo de Payandeh y Wang(1994) los hace diferentes en su formulación.

El modelo de Schumacher(1939) y Weibull ocupan el segundo lugar en cuanto al nivel de ajuste, aún cuando el modelo de Schumacher(1939) solo tiene un parámetro estimado es relevante su alto desempeño numérico.

Finalmente, los modelos compuestos poli-anamórficos con cambio continuo y cambio discreto presentan un pobre desempeño para este conjunto de datos utilizados provenientes de análisis troncales de *Pinus chiapensis*. Una posible causa de este nivel de ajuste bajo en los modelos 3 y 4 es el tamaño de muestra considerado en el presente estudio. Solo se incluyeron 31 análisis troncales, en tanto, Torres (2001) consideró 127 árboles como muestra. Realizó curvas polimórficas de índice de sitio para especies que habitan en clima templado frío en el Norte del país y obtuvo valores de pseudo- r^2 aceptables para estos modelos compuestos. Otra diferencia sustancial se basa

en el hecho de que las condiciones de crecimiento de las especies de pino incluidas por Torres (2001) crecen lentamente y *Pinus chiapensis* es considerada una especie de rápido crecimiento, por lo tanto, la tendencia del conjunto de datos en esta última presenta una forma sigmoide más vertical y alcanza su máximo desarrollo en una edad más temprana. Torres (2001) argumenta que en la medida en que la diferencia de edad es más pequeña, las curvas poli-anamórficas son consistentemente más eficientes. Esto solo indica que cuando el intervalo de predicción de índices de sitio es pequeño son más importantes los cambios en la forma que la tendencia general de la curva y viceversa, cuando el intervalo es grande, resulta de mayor importancia la tendencia general de la curva. Este resultado no solo es lógico, sino que ha sido usado empíricamente.

En el Cuadro 11, los parámetros estimados presentaron correlaciones negativas, esto significa que a medida que uno de estos parámetros aumenta, el otro disminuye y viceversa; excepto la correlación entre $\hat{B}_2$ y $\hat{B}_3$ del modelo Payandeh y Wang, la cuál resultó positiva. La magnitud de estas correlaciones es alta a excepción del modelo Weibull y el de Payandeh y Wang en su correlación positiva. El parámetro $\hat{\beta}_1$ de los modelos 11, 12 y 13 presentaron el mayor error estándar

Los modelos de Chapman-Richards(1959), Payandeh y Wang(1994), Schumacher(1939) y Weibull presentaron ajustes aceptables, no obstante, es necesario graficar las curvas que generan sobreponiéndolas en el diagrama de dispersión general y observar que las curvas no se salgan del rango de variación del conjunto de datos.

La Figura 7 muestra el nivel de ajuste gráfico del modelo de Payandeh y Wang (1994). Se observa que el conjunto de curvas se desplaza hacia la derecha del eje que representa la edad, lo que indica que en el índice de sitio más bajo IS 20 e incluso IS 25 se van saliendo del conjunto de las observaciones conforme es incrementada la edad base hasta el valor de 35. Es muy claro, que una buena representación de las curvas, en este modelo se logra a una edad base de 25 años. En la parte más alta de las curvas, las líneas tienden a unirse, debido a que esta ecuación alcanza incrementos cada vez menores en altura independientemente del índice de sitio y conforme incrementa la edad.

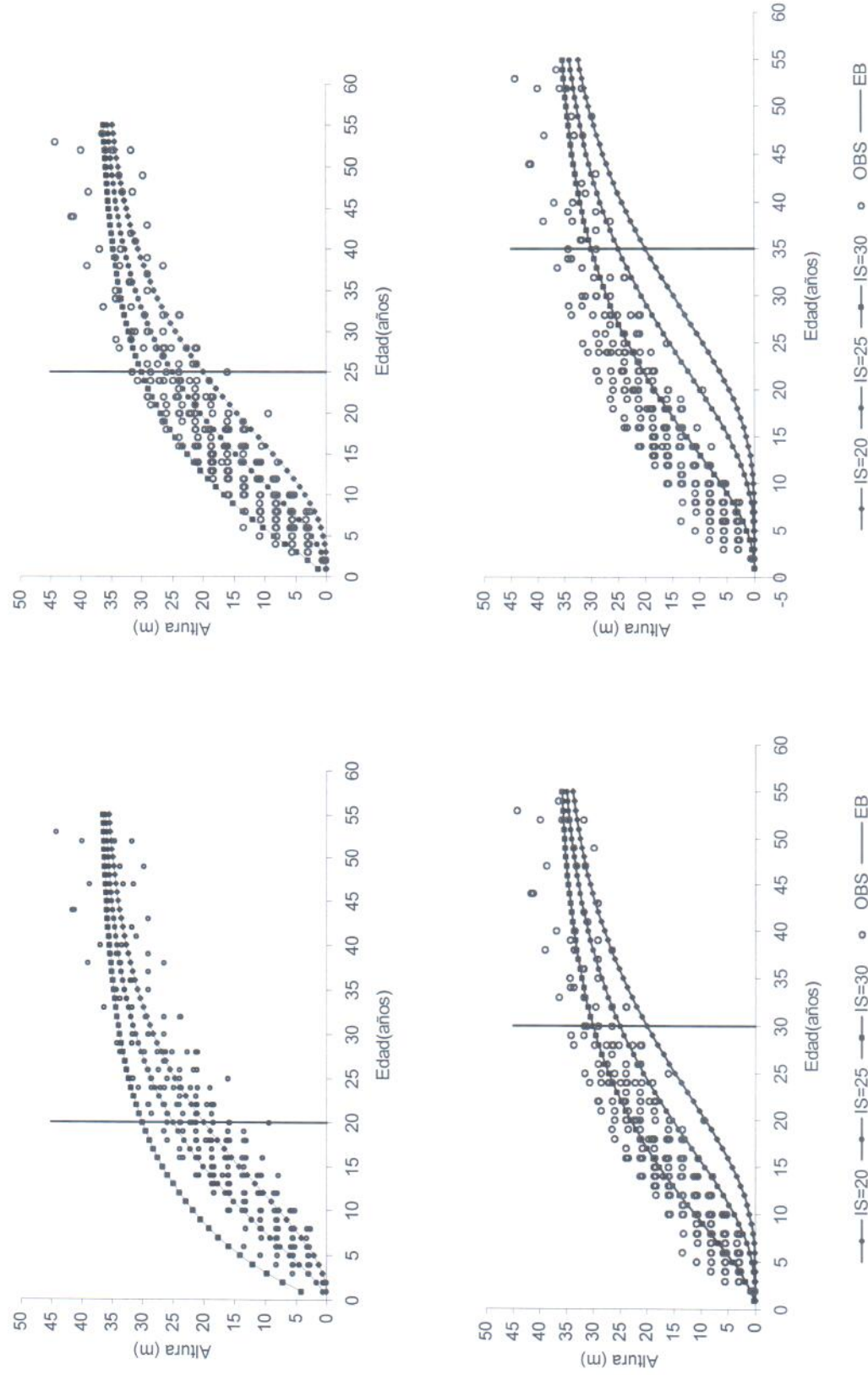


Figura 7. Evolución del conjunto de curvas de índice de sitio del modelo Payandeh y Wang (1994) conforme aumenta la edad base.

En el caso del modelo de Chapman-Richards, las curvas siguieron la misma tendencia para este conjunto de datos y prácticamente se superponen en cada índice de sitio, tal como se observa en la Figura 8 donde se ilustra la tendencia de ambos modelos a la edad base seleccionada.

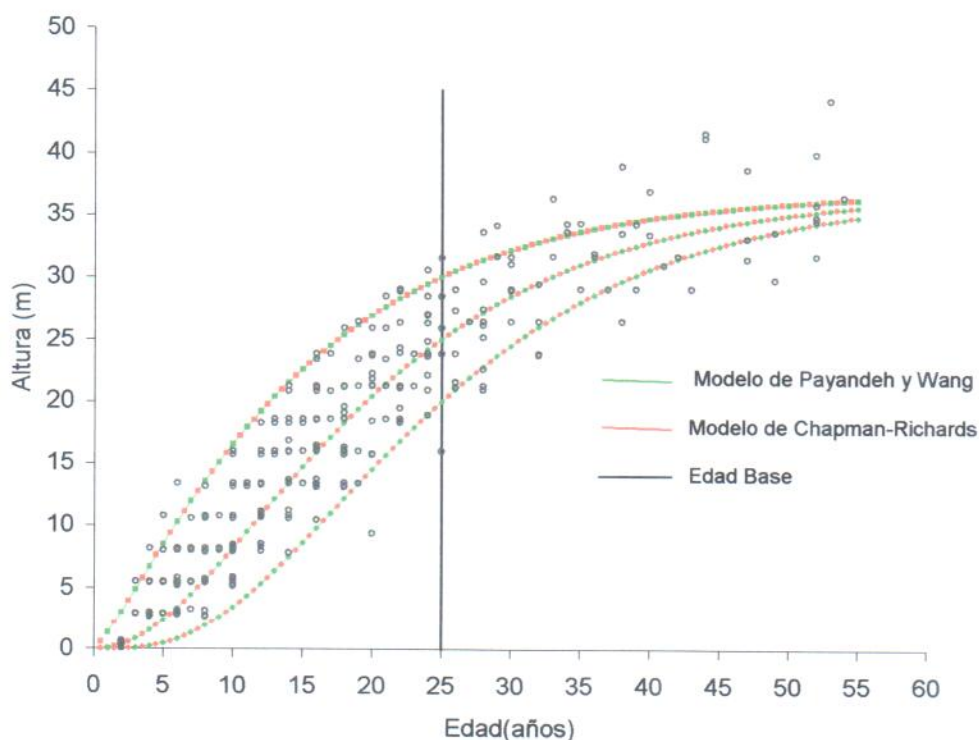


Figura 8. Comportamiento de curvas polimórficas correspondientes a los modelos de Chapman-Richards(1959) y Payandeh y Wang(1994) a una edad base de 25 años.

Considerando lo anterior, ambos modelos siguen la tendencia de los datos mostrados, excepto en su parte final correspondiente al intervalo de edad de 40 a 55 años donde tienden a compactarse las líneas, debido a la escasez de datos que se presentó en esta porción de la curva. Por lo tanto, los modelos de Chapman-Richards(1959) y el de Payandeh y Wang(1994) constituyen una buena opción para la estimación del índice de

sitio de *Pinus chiapensis* en el intervalo de edad de 1 a 55 años y una edad base de 25 años. La eficiencia alcanzada por el modelo de Payandeh y Wang(1994) coincide parcialmente con el resultado de Torres (2001) al anotar que este modelo tiene buen desempeño, probablemente debido al mayor número de parámetros.

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la familia de curvas de índice de sitio alcanzado con el modelo de Schumacher(1939) conforme incrementa la edad base. En términos generales se observa la misma tendencia que los modelos anteriores. A una edad base mayor, las curvas tienden a adquirir un patrón más aplanado y se desplazan hacia la parte más baja, generando errores más grandes en la predicción. En sitios ricos ($IS=30$), a medida que aumenta la edad del árbol, se observa una clara subestimación en el intervalo de edades de 40 a 55 años.

El modelo Weibull, aún cuando presentó ajustes aceptables, al momento de graficar el conjunto de curvas presentó desviaciones muy notables, por lo que no se incluyó en este análisis gráfico.

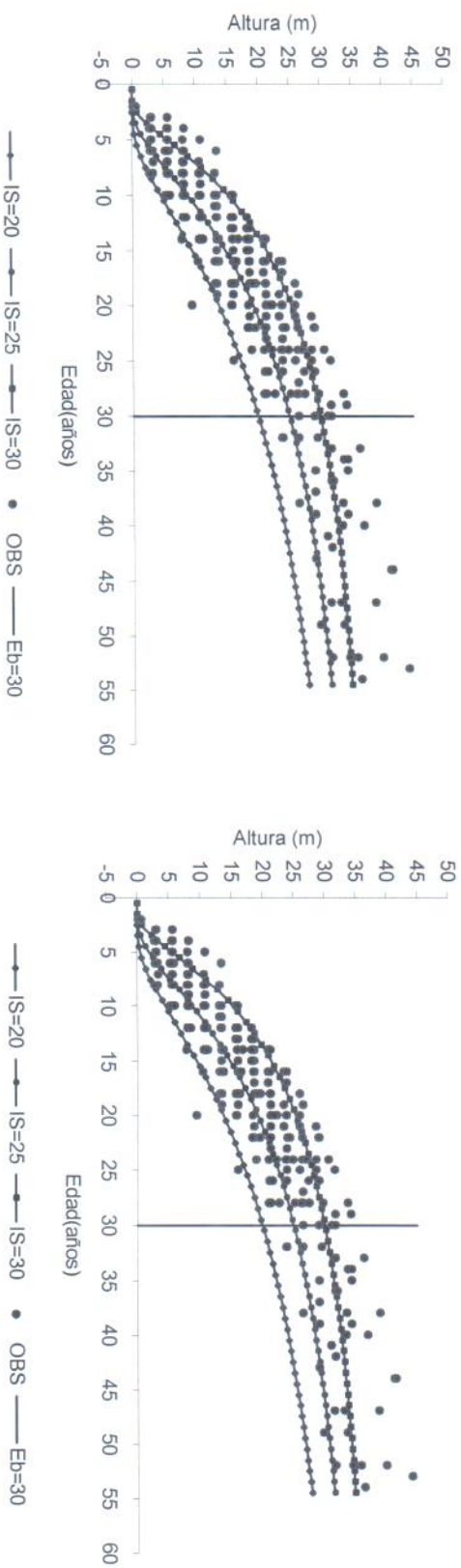
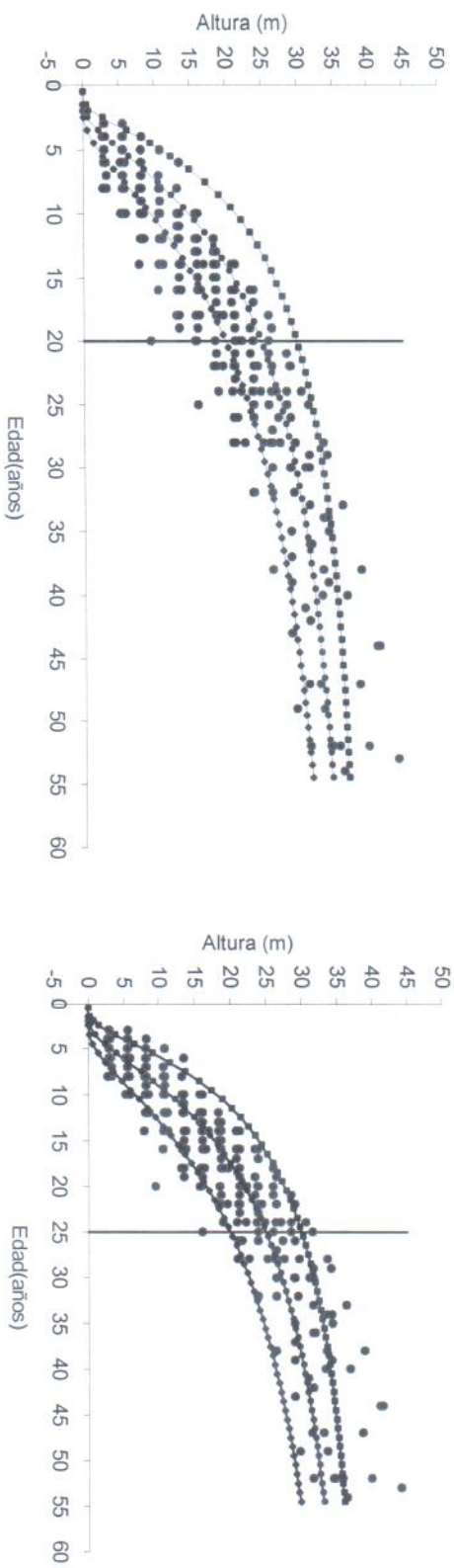


Figura 9. Evolución del conjunto de curvas de índice de sitio del modelo de Schumacher conforme aumenta la edad base.

Payandeh y Wang (1994) mostraron que es importante aplicar pruebas de validación de los modelos considerando datos con varias diferencias de edad para evaluar el desempeño de los modelos en diferentes intervalos de proyección, de lo contrario puede seleccionarse un modelo poco eficiente. La precisión de estos modelos solo es comprobada una vez que se realiza el proceso de validación, aspecto que quedará pendiente por realizar.

Es común encontrar en la bibliografía recomendaciones sobre el uso de formas polimórficas para evaluar índices de sitio en plantaciones (Bailey y Clutter, 1974; Winston y Demaerschalk, 1981; Payandeh y Wang, 1994; citados por Torres, 2001) y el uso de formas anamórficas para evaluar poblaciones naturales (Hann, 1995). Respecto a esta afirmación, son diversos los trabajos realizados en México donde se han aplicado modelos polimórficos en áreas naturales obteniendo ajustes aceptables.

Aunque el ajuste de los modelos seleccionados, en general, es satisfactorio, puede observarse (Figuras 7, 8 y 9) que existen todavía observaciones que no son bien representadas por el modelo estimado. Esto sugiere que tal vez deba considerarse el análisis a nivel de árbol, es decir, tomar en cuenta el efecto de árbol sobre los parámetros del modelo.

Una alternativa que se sugiere explorar es el uso de un modelo de regresión no lineal de efectos mixtos, ver por ejemplo: Davidian y Giltinan (1995) o Pinheiro y Bates (2000), el cual puede ser de utilidad en el modelaje de este tipo de respuestas, cuando hay variabilidad significativa en las estimaciones correspondientes a modelos de árboles individuales.

4.5.1. Estimación de alturas dominantes de índice de sitio.

Cuadro 12. Altura dominante estimada con los modelos de Chapman-Richards(1959), Payandeh y Wang(1994) y Schumacher(1939) para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, por clase de edad e índice de sitio.

Edad (años)	IS=20			IS=25			IS=30		
	Modelo			Modelo			Modelo		
	8	11	13	8	11	13	8	11	13
1	4E-07	0.0019	0.0021	1E-04	0.0694	0.0728	0.0092	1.30714	1.3358
2	0.0039	0.0231	0.024	0.0636	0.3392	0.3461	0.6209	3.04123	3.0664
3	0.0863	0.0934	0.0951	0.5538	0.8236	0.8317	2.5304	4.87676	4.8925
4	0.4052	0.2411	0.2434	1.6346	1.5053	1.5124	5.1084	6.72276	6.7285
5	1.0254	0.488	0.4903	3.1292	2.3572	2.3616	7.7865	8.53552	8.5322
6	1.904	0.848	0.8496	4.8245	3.3498	3.3506	10.313	10.2912	10.28
7	2.9624	1.3273	1.3276	6.5729	4.4539	4.4509	12.605	11.9764	11.96
8	4.1271	1.9255	1.9239	8.2886	5.6428	5.636	14.653	13.5837	13.563
9	5.3411	2.6371	2.6335	9.9272	6.8922	6.882	16.473	15.1098	15.086
10	6.5649	3.4531	3.4472	11.468	8.1811	8.1681	18.091	16.5535	16.529
11	7.7719	4.3616	4.3537	12.906	9.4913	9.4761	19.532	17.9155	17.89
12	8.9457	5.3495	5.3398	14.24	10.807	10.791	20.82	19.1976	19.172
13	10.076	6.4031	6.3918	15.476	12.116	12.099	21.976	20.4021	20.378
14	11.159	7.5084	7.4961	16.621	13.408	13.39	23.017	21.5321	21.509
15	12.19	8.6522	8.6393	17.682	14.673	14.655	23.96	22.5908	22.569
16	13.171	9.8218	9.8088	18.665	15.905	15.888	24.817	23.5816	23.562
17	14.101	11.006	10.993	19.578	17.099	17.083	25.598	24.508	24.491
18	14.983	12.194	12.182	20.427	18.251	18.237	26.313	25.3734	25.358
19	15.819	13.377	13.366	21.217	19.358	19.345	26.97	26.1813	26.168
20	16.611	14.547	14.537	21.955	20.418	20.407	27.575	26.935	26.924
21	17.362	15.697	15.689	22.645	21.43	21.422	28.134	27.6378	27.63
22	18.074	16.821	16.815	23.29	22.394	22.388	28.652	28.2928	28.287
23	18.749	17.916	17.912	23.896	23.31	23.306	29.133	28.9029	28.899
24	19.391	18.976	18.974	24.465	24.178	24.176	29.581	29.4711	29.469
25	20	20	20	25	25	25	30	30	30
26	20.58	20.985	20.987	25.505	25.776	25.778	30.392	30.4922	30.494
27	21.131	21.929	21.934	25.981	26.508	26.512	30.759	30.95	30.954
28	21.656	22.833	22.839	26.431	27.197	27.203	31.104	31.3759	31.381
29	22.157	23.695	23.703	26.857	27.846	27.853	31.428	31.7719	31.778
30	22.635	24.515	24.525	27.261	28.455	28.464	31.734	32.14	32.148
31	23.092	25.294	25.306	27.645	29.027	29.037	32.023	32.4821	32.491
32	23.528	26.032	26.046	28.009	29.563	29.575	32.297	32.8001	32.811
33	23.945	26.731	26.746	28.356	30.065	30.078	32.555	33.0956	33.107
34	24.345	27.391	27.408	28.686	30.535	30.55	32.801	33.3701	33.382
35	24.728	28.014	28.032	29	30.975	30.991	33.034	33.625	33.638
36	25.095	28.601	28.62	29.301	31.386	31.403	33.256	33.8618	33.876
37	25.447	29.153	29.173	29.588	31.77	31.788	33.467	34.0818	34.097
38	25.785	29.672	29.693	29.863	32.129	32.147	33.668	34.286	34.301
39	26.11	30.16	30.182	30.125	32.463	32.482	33.86	34.4756	34.492
40	26.423	30.617	30.64	30.377	32.775	32.795	34.044	34.6517	34.668
41	26.724	31.045	31.069	30.619	33.067	33.087	34.219	34.8151	34.832
42	27.013	31.447	31.471	30.851	33.338	33.358	34.387	34.9668	34.984
43	27.293	31.822	31.847	31.073	33.59	33.611	34.548	35.1076	35.125
44	27.562	32.174	32.199	31.287	33.826	33.847	34.702	35.2384	35.256
45	27.821	32.502	32.527	31.493	34.045	34.066	34.85	35.3597	35.378
46	28.072	32.809	32.834	31.692	34.249	34.271	34.993	35.4723	35.491
47	28.314	33.095	33.121	31.883	34.439	34.461	35.129	35.5767	35.596
48	28.548	33.362	33.388	32.067	34.615	34.637	35.261	35.6737	35.693
49	28.774	33.611	33.637	32.244	34.779	34.802	35.387	35.7637	35.783
50	28.993	33.844	33.869	32.416	34.932	34.954	35.509	35.8472	35.866
51	29.205	34.06	34.086	32.581	35.074	35.096	35.627	35.9246	35.944
52	29.41	34.262	34.288	32.741	35.206	35.228	35.74	35.9965	36.016
53	29.609	34.45	34.475	32.896	35.328	35.351	35.85	36.0632	36.083
54	29.802	34.624	34.65	33.045	35.442	35.465	35.956	36.1251	36.145
55	29.989	34.787	34.813	33.19	35.548	35.571	36.058	36.1825	36.202

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Los modelos polimórficos de Chapman-Richards(1959) y Payandeh y Wang(1994) fueron seleccionados para construir la familia de curvas con las que se puede calificar el índice de sitio para la especie *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en virtud de que presentaron un valor de pseudo coeficiente de determinación (r^2) de 0.983.
2. De seis modelos polimórficos probados, otros dos presentaron ajustes aceptables: Schumacher(1939) y Weibull, los cuales obtuvieron un pseudo coeficiente de determinación (r^2) superiores a 0.95. Sin embargo, el modelo de Weibull no representó adecuadamente la tendencia del conjunto de datos observados.
3. La amplitud de dispersión de los datos de altura dada por la muestra fue muy estrecha, por lo que solo se fijaron tres índices de sitio: 20, 25 y 30 a una edad base de 25 años.
4. Se recomienda realizar la validación de esos modelos utilizando una muestra independiente. Es importante que se incluya una mayor variabilidad en la muestra para reducir los errores en las predicciones del modelo, así como probar otros modelos que tengan mejor comportamiento a edades entre 35 y 50 años.

6. LITERATURA CITADA.

- Acosta Mireles, M. 1991. Modelo de crecimiento para *Pinus montezumae* Lamb. en el C.E.F. "San Juan Tetla", Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 88 p.
- Aguilar R., M. 1994. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Ciencia forestal*. 16(70): 87-108.
- Aguirre Calderón, O.A. 1984. Estimación de índices de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en la región de Iturbide, Nuevo León. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 71 p.
- Alexander, R.R. 1967. Site indexes for Engelmann Spruce in the Central Rocky Mountains. U.S. D.A. Forest Service. Research Paper RM-32 p.
- Arteaga Martínez, B. 1985. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl et Cham., en la región Chignahuapan, Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 181 p.
- Avery, T.E. y Burkhart, H.E. 1983. *Forest Measurements*. Tercera edición. McGraw Hill. U.S.A. 331 p.
- Ayerde Lozada, D. 1996. Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 120 p.
- Bailey, R.L. and Clutter, J.L. 1974. Base-Age invariant polymorphic site curves. *Forest Science*. 20(2): 155-159.
- Beck, D.E. y Trousdell, K.B. 1973. Site index: accuracy of prediction. U.S.D.A. Forest Service. Research Paper SE-108. 7 p.
- Bojorges Sosa, J. A. 2000. Uso de estadísticos de orden para construir curvas de índice de sitio. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 117 p.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Piennar, J.C., Brister, L.V. y Bailey, R.L. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley &

Sons. E.U.A. 333 p.

- Dvorak W. S., E. A. Gutiérrez, L. F. Osorio, L. Van der Merwe, P. Kikuti and K. Donahue. 2000. *Pinus chiapensis*. In: Conservation & testing of tropical & subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. College of Natural Resources. North Carolina State University. Raleigh, NC, USA. pp: 34-51.
- Graney, D.L. y Burkhart, H.E. 1973. Polymorphic site index curves for shortleaf pine in the Ouachita Mountains. USDA Forest Service. Southern Forest Exp. Sta. Research Paper SO-85. 14 p.
- Hernández G., J. J. 1986. Variación morfológica de acículas, conos y semillas de *Pinus chiapensis* de Oaxaca y Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 91 p.
- Kariuki, M. 2002. Height estimation in complete stem analysis using annual radial growth measurements. *Forestry* 75(1): 63-74.
- Kiessling, D. F.J. 1978. Análisis troncales, ejecución, aplicación actual y perspectivas. In: La investigación forestal en las unidades forestales y organismos descentralizados. Pub. Esp. Ins. Nal. Invest. For. 15. México. pp. 9-54.
- Klepac, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Dirección General de Difusión Cultural. Chapingo, México. 365 p.
- Landeros S., S. 1994. Indices de sitio para *Pinus durangensis* y *Pinus teocote*, en el área de influencia de la Unidad de Administración Forestal "Santiago Papasquiaro". Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 46 p.
- Mackay, E. 1964. Dasometría: Teoría y técnica de las mediciones forestales. Madrid, España. Diana, artes gráficas. 760 p.
- Madrigal H., S. y Ramírez M., H. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índice de sitio en Michoacán. *Ciencia forestal*. 20(78):35-57.

- Martínez Carrasco, N. 1998. Atributos poblacionales y reproductivos de *Pinus chiapensis* en Chiapas, México. Anales del Instituto Biología. Serie Botánica 69(2):119-134.
- Martínez, M. 1992. Los pinos mexicanos. 3 ed. Ediciones Botas. México. 361 p.
- Mas Porras, J. 1970. Instructivo para realizar análisis troncales. México. D.F. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. 10 p. (Boletín Divulgativo no. 23).
- Monroy Rivera, C.R. 1997. Evaluación de crecimiento y productividad de *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Huayacocotla, Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo león, México. 92 p.
- Moreno Chan, J. 1996. Comparación de dos métodos de construcción de curvas de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en la región Hidalgo-Zinapécuaro de Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 68 p.
- Payandeh, B. y Wang, Y. 1994. Relative accuracy of a new base-age invariant site index model. Forest Science. 40(2):341-348.
- Pérez Verdín, G. 1990. Determinación de índices de sitio para *Pinus arizónica* Engelm. En la región Noroeste del estado de Durango. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 96 p.
- Pinheiro, J.C. and Bates, D. M. 2000. Mixed-Effect Models in S and S-PLUS. Springer. New York, U.S.A. 528 p.
- Sánchez V., NM y Del Castillo S, RF. 2001. Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en "El Rincón", Oaxaca, México. Foresta Veracruzana. 3(2):9-12.
- SAS (SAS Institute Inc, US). 1990. SAS/STAT. User's guide, versión 6. 4 ed. Cary, NC. Vol. 2. 846 p.

- SEDESOL. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL/94, que determina las especies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas, raras, endémicas, amenazadas, en peligro de extinción y las sujetas a protección especial. (Secretaría de Desarrollo Social) Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 16 de mayo de 1994.
- Téllez Pérez, M.C.L. 1999. Estado del conocimiento de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 395 p.
- Torres Rojo, J.M. y Magaña Torres, OS. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa. México. 472 p.
- Torres Rojo, J.M. 2001. Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. Agrociencia 35:87-98.
- Trimble, G.R.(JR) y Weitzman, S. 1956. Site index studies of Upland Oaks in the Northern Appalachians. Forest Science 2(3):162-173.
- Villa Salas, A.B. 1975. Los anillos de crecimiento en la dasometría. México y su bosques. 14(6): 27-28.
- Wright, J.A., Marín, A.M. y Dvorak, W.S. 1996. Conservation and use of the *Pinus chiapensis* genetic resource in Colombia. Forest Ecology and Management. 88: 283-288.
- Zepeda Bautista, E.M; Verruete B., S; Estrada M., O. y Esparza P., S. 1990. Curvas polimórficas de índice de sitio de edad base invariante, para tres especies de pino del noroeste de Chihuahua. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo. 40 p. (Boletín Técnico, no. 25).