

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



**ÍNDICE DE SITIO PARA *Pinus herrerae* Martínez EN LA REGIÓN DE CD.
HIDALGO, MICHOACÁN**

Por:

OSCAR MARES ARREOLA

**TESIS PROFESIONAL
Presentada como Requisito Parcial
Para Obtener el Título de**

INGENIERO FORESTAL

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2003**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"**

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

**ÍNDICE DE SITIO PARA *Pinus herrerae* Martínez EN LA REGIÓN DE CD.
HIDALGO, MICHOACÁN**

Por:

OSCAR MARES ARREOLA

TESIS:

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

APROBADA

ASESOR PRINCIPAL

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN
DE AGRONOMÍA**

Ph. D. ELADIO H. CORNEJO OVIEDO

M.C. ARNOLDO OYERVIDES GARCÍA

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2003**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

**ÍNDICE DE SITIO PARA *Pinus herrerae* Martínez EN LA REGIÓN DE CD.
HIDALGO, MICHOACÁN**

TESIS PROFESIONAL

POR

OSCAR MARES ARREOLA

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO FORESTAL

APROBADA:

**Ph D. ELADIO H. CORNEJO OVIEDO
ASESOR PRINCIPAL**

**M.C. SALVADOR VALENCIA MANZO
ASESOR**

**ING. CELESTINO FLORES LÓPEZ
ASESOR**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2003**

El presente trabajo forma parte del Proyecto "Mediciones forestales en las regiones forestales de los estados de Durango, Michoacán y Nayarit" de la Universidad Autónoma "Agraria Antonio Narro", con clave 02.03.0207.2364 (de 2001 a 2002) cuyo responsable es el Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo.

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuela Felipa Gómez Carrillo, por todo el cariño recibido gracias, donde quiera que estes.

A mi madre María del Rosario Arreola Fernández, con infinito cariño, por ser la persona que mas admiro y respeto en este mundo, gracias por su apoyo, comprensión y motivación para seguir estudiando, por haberme traído a este mundo.

A mi padre Nicasio Mares Gómez, por sus consejos y apoyo para seguir adelante en la vida.

A mis hermanos (as): Juan Carlos, María del Carmen, Paulina, Lorena y Norma. Por su amor y comprensión, por sus palabras de aliento que me motivaron en el transcurso de mi formación profesional y por todas las tristezas y alegrías que hemos pasado juntos.

A mis primos: Hugo, Cesar y Carlos, por su apoyo moral y económico, y por la confianza que depositaron en mi.

A mi tía Genoveva Gómez, por todo el apoyo y confianza brindados.

A mis sobrinas: Yessica Alejandra, Karla y Karen, porque con su llegada a este mundo llenan de alegría nuestro hogar y por hacerme tío en el transcurso de mi carrera.

A mis cuñados: José y Manuel, por el apoyo moral y los momentos compartidos.

A una persona muy especial: Cecilia Alamilla Pérez, por su confianza y cariño.
Gracias por hacer mi vida feliz.

A todas las personas que en este momento mi mente deja escapar..... gracias.

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro señor por permitirme ser alguien en la vida y por guiar mi camino en todo momento.

A mi "ALMA MATER", por darme todo sin pedirme nada a cambio.

Al Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo por su valiosa asesoría y constancia en la revisión del presente trabajo, por su gran paciencia y haberme permitido formar parte de su equipo de trabajo. Especialmente, quiero agradecer su gran amistad y contribuciones a mi desarrollo profesional y personal.

Al M.C. Salvador Valencia Manzo, por su brindarme su apoyo y sus valiosas aportaciones para mejorar este trabajo. Gracias por su amistad y contribuciones a mi desarrollo profesional y personal.

Al Ing. Celestino Flores López , por sus comentarios y aportaciones que contribuyeron a mejorar el presente trabajo, por su amistad.

Al Departamento Forestal de la Universidad por las facilidades otorgadas que de alguna u otra manera influyeron en mi formación como profesionista.

A los técnicos de la Ucodefo-2 de Cd. Hidalgo, Mich., por su valiosa colaboración para la realización del presente trabajo.

A mi compañero y amigo José Cain Calvillo García, por el apoyo en la obtención de rodajas en campo, por su gran amistad y por todas las anécdotas compartidas.

A mis compañeros de la carrera de Ingeniero Forestal: Ubaldo, Eleazar, Juan, Carlos, José Antonio, Carmen, Jordan y al buen Gil, por su gran amistad.

A la familia Silva Carrillo, por su apoyo moral y por permitirme entrar a su hogar.

A todas aquellas personas que de alguna forma participaron en la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN	v
ÍNDICE DE SITIO PARA <i>Pinus herrerae</i> Martínez EN LA REGIÓN DE CD. HIDALGO, MICH.	1
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Descripción del área de estudio	6
Recorridos de campo	10
Diseño de muestreo	11
Análisis troncales	12
Acondicionamiento de rodajas en laboratorio	12
Captura y procesamiento de datos	13
Metodología para detección de árboles suprimidos	14
Selección del modelo de crecimiento e incremento en altura utilizando el método anamórfico	16
Determinación del índice de sitio con base en el método anamórfico	19
Equidistancia entre las curvas anamórficas de índice de sitio	22
Determinación del índice de sitio con base en el método polimórfico	23

Equidistancia entre las curvas polimórficas de índice de sitio	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
Crecimiento en altura con el método anamórfico	28
Crecimiento en altura con el método polimórfico	32
Curvas de incrementos corriente y medio anual en altura con base en el método anamórfico	41
Curvas anamórficas de índice de sitio	41
Curvas polimórficas de índice de sitio	45
CONCLUSIONES.....	56
RECOMENDACIONES	58
LITERATURA CITADA.....	60
APÉNDICES.....	68

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
1. Principales características del clima que se presenta en el área de estudio	9
2. Modelos matemáticos probados para la estimación de la curva guía de <i>Pinus herrerae</i> Martínez en Cd. Hidalgo, Mich.	17
3. Altura estimada por edad e índice de sitio para <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	44
4. Calidad de estación e índice de sitio de <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	44
5. Altura estimada (corregida) por edad e índice de sitio para <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	46
6. Calidad de estación e índice de sitio de <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Ubicación de las localidades para el índice de sitio de <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	7
2. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura y el ajuste de los modelos Chapman-Richards, Gompertz, Logístico y Schumacher, para <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	29
3. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura y ajuste del modelo Chapman-Richards para <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	31
4. Curvas de incremento en altura y edad base de 32 años para <i>Pinus herrerae</i> Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	42
5. Curvas anamórficas de índice de sitio para <i>Pinus herrerae</i> Martínez a una edad base de 32 años, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	43
6. Curvas polimórficas de índice de sitio (corregidas) para <i>Pinus herrerae</i> Martínez a una edad base promedio de 40 años, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	48
7. Curvas anamórficas de índice de sitio expresadas en función de los incrementos corriente (ICA) y medio anual (IMA) en altura y la edad base a 32 años de <i>Pinus herrerae</i> Martínez, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	53
8. Curvas polimórficas de índice de sitio expresadas en función de los incrementos corriente (ICA) y medio anual (IMA) en altura y la edad base a 40 años de <i>Pinus herrerae</i> Martínez, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.	55

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar el índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich. El área de estudio la comprenden seis localidades: Huajumbaro, La Venta de San Andrés, El Molcajete, San Antonio Villalongín, La Joya y Rancho Los Coss, en cuyos lugares se distribuye de manera natural la especie en estudio. Se diseñó una metodología para detectar los árboles suprimidos en los primeros 25 años de edad. Se utilizaron los métodos de la curva guía y predicción del parámetro, para el primer método se probaron cuatro modelos de crecimiento (Chapman-Richards, Gompertz, Logístico y Schumacher) y para el segundo solo se usó el modelo de Chapman-Richards. Con el método de la curva guía, el mejor modelo fue el de Chapman-Richards, ya que presentó el valor más bajo del CME=7.48915 y el valor más alto del $R^2=0.98450$, además los residuales estudentizados presentaron una buena distribución. Para el caso del método de predicción del parámetro, el modelo de Chapman-Richards mostró un buen ajuste, esto por su valor bajo del CME=7.9158 y alto de $R^2=0.9831$. Con el método de la curva guía se generaron cinco curvas anamórficas de índice de sitio correspondientes a los índices de sitio de 13.46, 16.46, 19.46, 22.46 y 25.46 m con una amplitud de tres m a la edad base de 32 años y con el método de predicción del parámetro se generaron cinco curvas polimórficas de índice de sitio correspondientes a los índices de sitio de 15.5, 18.5, 21.5, 24.5 y 27.5 m con una amplitud de tres metros a la edad base promedio de 40 años, siendo esta edad 8 años mayor con respecto a la determinada en el método de la curva guía.

ÍNDICE DE SITIO PARA *Pinus herrerae* Martínez EN LA REGIÓN DE CD.

HIDALGO, MICH.

INTRODUCCIÓN¹

México es un país que cuenta con gran diversidad de recursos forestales lo cual es resultado de la gran variabilidad ambiental que se presenta en todo el territorio nacional (INEGI, 2000). Con relación a lo anterior, cabe señalar que México cuenta con un alta diversidad de especies del género *Pinus*, siendo reportadas 49 especies de este género para nuestro país, lo cual representa el 45% de las especies conocidas a nivel mundial (Styles, 1993; Layseca, *et al.*, 1997).

Pese a la alta diversidad del género *Pinus* no se cuenta con suficiente información del potencial productivo de los bosques, por lo tanto las decisiones de manejo y de aprovechamiento no siempre han sido las adecuadas (De la Fuente, 1985; Aguilar y Aguilar, 1991; Benavides, 1991; Benavides y Manzanilla, 1993; Monroy, 1996; Moreno, 1996; Aguilar, 1997; Layseca *et al.*, 1997), ya que al no clasificar la productividad del bosque se corre el riesgo de que los sitios con baja productividad se sobre aprovechen y sitios con alta productividad se desaprovechen.

¹ Esta tesis fue elaborada siguiendo la guía de autores de la revista Madera y Bosques.

Michoacán cuenta con una superficie de 1'540,493 ha de bosques de coníferas y latifoliadas (SEMARNAP, 1999). Los poseedores del recurso forestal en la región de Cd. Hidalgo, Mich., dependen económicamente de él, por lo que es importante realizar estudios de índice de sitio, los cuales permitan clasificar dichos bosques de acuerdo con su capacidad productiva para definir los tratamientos que deben aplicarse en relación a su potencial productivo.

La determinación de la calidad de estación (capacidad de producción) es una herramienta valiosa en el manejo con propósitos múltiples y uno de los parámetros más importantes a considerar en la toma de decisiones del manejo integral forestal, ya que afecta considerablemente el valor cuantitativo y cualitativo del bosque (Aguilar y Aguilar, 1991; Benavides, 1991). La determinación de la misma, es una de las principales actividades que un silvicultor debe realizar como parte de la información necesaria para conformar un plan de manejo (Quiñones *et al.* 2002).

La calidad de estación se define como una cualidad distintiva que indica en forma un tanto relativa, el grado de productividad de un lugar, bajo las condiciones imperantes en el momento en que se efectúa la estimación (Clutter *et al.*, 1983; Zepeda y Rivero, 1984). Además se refiere a la producción potencial de madera del sitio para una especie en particular. Los métodos que existen son solamente indicadores y no métodos que permitan conocer exactamente la calidad de estación (Clutter *et al.*, 1983).

Los principales métodos de estimación de la calidad de estación se clasifican en directos e indirectos. Los primeros realizan la estimación a partir de registros de producción y con datos de volumen y altura del rodal. Los segundos, a partir de la relación que hay entre las especies, de las características de la vegetación y de los factores topográficos, climáticos y edáficos (Clutter *et al.*, 1983). La elección para aplicar cualquiera de ellos está en función del bosque, de los recursos con que se cuente, la posibilidad de uso de equipo para proceso de datos, la precisión que se requiera y la facilidad con que se pueda aplicar el método (Spurr y Barnes, 1980; Benavides, 1991).

El índice de sitio a partir de la relación edad-altura dominante se ha utilizado como indicador de la calidad de estación por ser más práctico y consistente en la cuantificación de la productividad (Curtis, 1964).

El índice de sitio se define como la máxima altura que alcanza un bosque o rodal de acuerdo al sitio donde se desarrolla a una edad determinada o edad base. Existen dos puntos deseables sobre los cuales es posible fijar la edad base: en el momento en que los incrementos corriente y medio anual en altura se interceptan y cerca de la edad del turno fijado (Zepeda y Rivero, 1984).

La altura dominante se utiliza como indicador de productividad, ya que es la menos afectada por la densidad del rodal y del manejo, siempre y cuando las podas no sean intensas, además de que la altura de los árboles, se relaciona más con la capacidad de producción de madera que cualquier otra variable del rodal,

partiendo del supuesto que el crecimiento en altura no se ve afectado por la densidad del bosque (Alder, 1980; Spurr y Barnes, 1980; Zepeda y Rivero, 1984).

Para describir la relación entre la altura y la edad de un rodal o árbol individual, se han utilizado diferentes métodos y técnicas tales como: a) método de la curva guía, b) método de la diferencia algebraica y c) método de predicción de parámetros (Clutter *et al.*, 1983).

Clutter *et al.* (1983) señalan que de acuerdo a las técnicas de construcción de curvas de índice de sitio y a la forma de las mismas, estas pueden ser anamórficas o polimórficas. Las curvas anamórficas se caracterizan porque todas las curvas presentan la misma forma, es decir, que cada curva para las diferentes clases de sitio guardan la misma proporción, además de que pueden ser construidas por métodos gráficos o bien a través de una ecuación de regresión. Las curvas polimórficas presentan diferente forma para cada clase de índice de sitio y no guardan una proporción para las clases de índice de sitio, por tal razón sus puntos de inflexión suceden ocurren a diferentes edades. Estas pueden tomar la forma de curvas polimórficas articuladas y no articuladas.

Moreno (1996) realizó un estudio de índices de sitio mediante la comparación de dos métodos de construcción de curvas de índices de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región de Hidalgo-Zinapécuaro, Mich. Obtuvo los pares de valores de edad-altura con análisis troncales de 51 árboles dominantes, y utilizó los métodos de predicción de parámetros y de la diferencia algebraica, así

como los modelos de Schumacher y Chapman-Richards. El autor encontró que los modelos desarrollados con el método de predicción del parámetro mostraron un ajuste estadístico aceptable y una mayor fidelidad para expresar la tendencia de los valores observados.

Franco (2001) realizó un estudio para determinar el índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en Cd. Hidalgo., Mich., para ello colectó rodajas de 28 árboles; realizó el análisis troncal y determinó el índice de sitio por medio del método de la curva guía. El autor usó tres modelos de crecimiento que fueron el de Chapman-Richards, Schumacher y el de Gompertz, determinando que el modelo con mejor ajuste para describir la relación edad-altura fue el de Chapman-Richards.

Por lo anterior, es importante probar y generar modelos para clasificar la capacidad productiva de los terrenos forestales, ya que pueden ser utilizados para la instrumentación de esquemas de regulación que permitan dar al bosque la intensidad de manejo correspondiente a su nivel de productividad (Madrigal y Ramírez, 1995).

No existe información en la región de Cd. Hidalgo en donde se reporten trabajos de índice de sitio para *Pinus herrerae*. Por lo que, el objetivo del presente trabajo fue determinar el índice de sitio para *Pinus herrerae* Mart. en la región de Cd. Hidalgo, Mich., probando los métodos de la curva guía y la predicción del parámetro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área está ubicada en la subprovincia fisiográfica denominada Mil Cumbres en la región de Cd. Hidalgo (Ucodefo-2, 1994), la cual a su vez forma parte del Eje Neovolcánico Transversal o provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico. El área de estudio la comprenden seis localidades: Huajumbaro, La Venta de San Andrés, EL Molcajete, San Antonio Villalongín, La Joya y Rancho Los Coss, en cuyos lugares se distribuye de manera natural la especie en estudio (Figura 1). Las primeras cuatro localidades se localizan en el municipio de Cd. Hidalgo y las últimas dos en el municipio de Zinapécuaro. Estas localidades tienen una ubicación geográfica entre las coordenadas 19° 30' 35" a 19° 52' 27" de latitud Norte y 100° 41' 36" a 100° 47' 44" de longitud Oeste (CETENAL, 1977a, 1977b, 1977c).

El área presenta altitudes que van desde los 2100 a 3000 msnm, con pendientes que van del 10 al 40 %. En las áreas de estudio predominan las exposiciones Norte, Noreste, Noroeste, Sur, Sureste y Suroeste. Además ocurre un relieve contrastante en el que se distinguen mesetas, lomeríos y sierras (CETENAL, 1977 a, 1977b, 1977c).

La geología está representada principalmente por rocas ígneas extrusivas de la era cenozoica, del periodo terciario superior; prevaleciendo el tipo de rocas

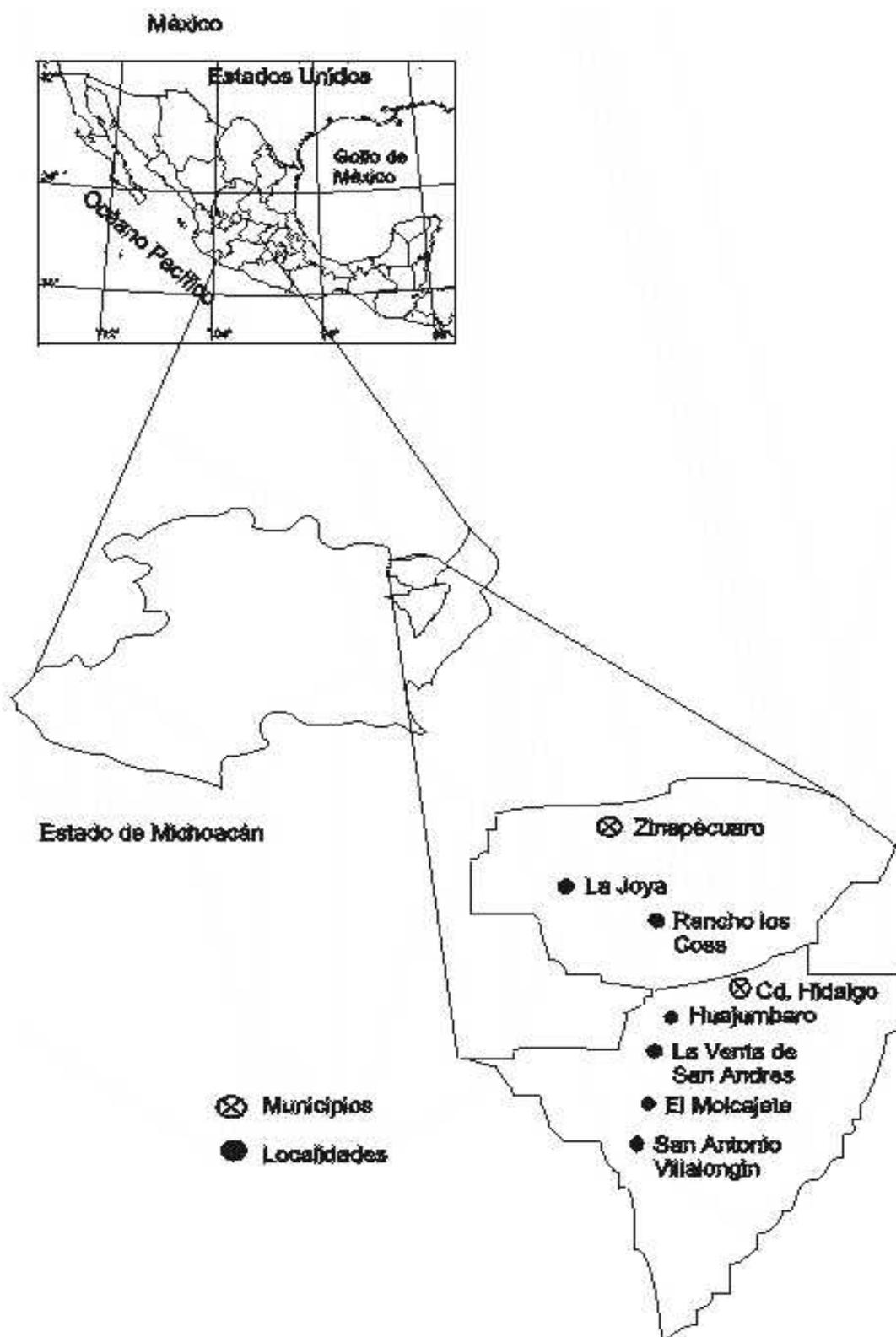


Figura 1. Ubicación de las localidades para el índice de sitio de *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

como reolita de color verde, formando cuerpos compactos medianamente alterados. En el área de estudio también ocurren andesitas de color rosa compactada, la cual subyace a otra andesita de fracturamiento intenso y de color gris (DETENAL, 1979a, 1979b, 1979c).

Los suelos que predominan en la región son de tipo andosol, con textura media. El drenaje de estos suelos es clasificado como bueno y de profundidad media (CETENAL, 1977d, 1977e, 1977f).

El área de estudio está dividida por dos regiones hidrológicas (RH), la región RH18 "Cuenca del Río Balsas" y la región RH12 "Sistema Fluvial Lerma Santiago". La mayor parte del área de estudio se encuentra en la región RH-18 Cuenca del Río Balsas, dentro de la cuenca hidrológica G Río Cutzamala (Ucodefo-2, 1944; SEMARNAP-UACH, 1999).

En la región ocurre un clima húmedo; templado con verano fresco y largo; subhúmedo con régimen de lluvias en verano; con menos del 5% de lluvia invernal, con temperatura media anual que varía de 25 a 30 °C, con el mes más caliente del año antes de junio y con una precipitación media anual de 1250 mm (García, 1973). A continuación se muestran las características del clima que se presenta en el área de estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Principales características del clima que se presenta en el área de estudio.

Localidad (nombre)	Temperatura (°C)			Pp. Media (mm)	Periodo libre de heladas (días)	Fórmula Climática
	Media	Máxima	Mínima			
Agostitlán	14.1	24.8	3.9	1,263.3	180	C b(w2) w i
Gerahuario	12.2	31.0	3.2	1,171.0	120	C b(w1) w l
Huajumbaro	17.2	29.9	4.5	1,383.8	180	C b(w1) w i g
Pucuato	14.2	25.3	3.2	1,294.4	120	C b(w2) w i

Periodo libre de heladas son temperaturas por arriba de 4.5 °C (García, 1986).

Fuente: CONAGUA, 1999. Pp. = precipitación pluvial

La vegetación que ocurre en el área de estudio es un bosque de clima templado constituido por: *Pinus herrerae* Mart., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. michoacana* Mart., *P. leiophylla* Schl. & Cham., *Abies religiosa* Schl. y *Quercus castanea* Neé, *Q. crassifolia* Humb. Et Bonpl., *Q. obtusata*, *Q. microphylla* Neé, *Q. laurina* Humb & Bonpl., *Alnus firmifolia* Fern., *A. arguta* Spach., *Crataegus mexicana* Moc. & Sessé, y *Arbutus xalapensis* H. B. K. La cubierta arbustiva la conforman especies como: *Terpstroemis pringlei*, *Baccharis conferta* H. B. K., *Dodonaea viscosa* (L) Jacp., *Urtica dioica* Willd, *Arctostaphylos longifolia*, *Rubus pringlei*, *Solanum nigrum* L., *Eupatorium glabratum* H. B. K. y *Buddleia sessiliflora* H. B. K. El estrato herbáceo lo constituyen elementos como: *Alchemilla procumbens* Rose, *Arenaria lanuginosa* Rohrb., *Eryngium palmeri*, *Geranium seemanni* Peyr., *Muhlenbergia robusta* (Fourn.) Hitchc., *Oxalis alpina* Rose, *Panicum bulbosum* H. B. K. y *Stipa virens* H. B. K. (Martínez *et al.*, 1987).

Recorridos de campo

Se realizaron dos recorridos de campo para conocer el área de estudio y tomar decisiones con respecto a la metodología del trabajo. El primer recorrido se realizó del 1 al 6 de abril de 2002, el cual tuvo los siguientes objetivos: 1) recorrer el área de estudio; 2) reconocer los sitios en donde se distribuye de manera natural *Pinus herrerae*; 3) observar los sitios con diferencias contrastantes de productividad; 4) visitar las áreas bajo aprovechamiento para observar la presencia de árboles dominantes y/o codominantes; y 5) diseñar la logística para la colecta de rodajas de madera.

Se eligieron seis localidades con base en los siguientes criterios: a) áreas en las que se distribuye la especie sujeta al estudio y b) que se observaran diferencias en productividad.

El segundo recorrido se realizó del 2 al 7 de diciembre de 2002, siendo sus objetivos los siguientes: 1) seleccionar árboles dominantes y/o codominantes resinados y no resinados; 2) coleccionar rodajas de 41 árboles para realizar análisis troncales y 3) acondicionar las rodajas para su traslado al Laboratorio de Silvicultura del Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Durante los recorridos se observó que la resinación es una práctica común y constante en la región, por lo que la mayoría de los árboles dominantes y codominantes candidatos a elegirse para los análisis troncales estaban resinados.

Diseño de muestreo

Se utilizó un muestreo selectivo para elegir los árboles muestra para realizar los análisis troncales. Los criterios usados para elegir a dichos árboles fueron los siguientes:

- 1) Árboles dominantes y/o codominantes de *Pinus herrerae*.
- 2) Sin problemas fitosanitarios.
- 3) No despuntados y no bifurcados.
- 4) Sin daños causados por incendios.
- 5) Se permitieron únicamente daños causados por la resinación dado que es una práctica común en la región.

En total se consiguieron rodajas de 41 árboles, siendo el número de árboles en cada localidad el siguiente: 6 de Huajumbaro, 4 de La Venta de San Andrés, 6 de El Molcajete, 20 de San Antonio Villalongín, 3 de La Joya y 2 de Rancho Los Coss.

Los árboles muestra fueron derribados con ayuda de una motosierra utilizando lo que se conoce como derribo direccional, esto con la finalidad de

provocar menores daños a la regeneración y a los árboles de menores dimensiones. El corte se hizo a partir del tocón a una altura de 0.25 a 0.30 m, y a partir de éste se seccionaron trozas a lo largo del fuste del árbol a medidas comerciales 8' (2.54 m), obteniéndose rodajas de 3 a 6 cm de grosor de cada altura de corte (Klepac, 1976). Para la identificación de las rodajas en la parte inferior de las mismas se anotó con un crayón de cera la localidad, el número de árbol y la altura de corte.

Las rodajas se sometieron a un proceso de secado al aire libre. Posteriormente, se metieron en costales para su traslado de Cd. Hidalgo, Mich. al Laboratorio de Silvicultura del Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Análisis troncales

Acondicionamiento de rodajas en laboratorio

Una vez que las rodajas estaban en el laboratorio, se ordenaron y se remarcaron de acuerdo con la clave de identificación. Como último proceso de acondicionamiento las rodajas se pulieron usando pulidoras eléctricas (Bosh y Dewalt), utilizando lijas de diferentes calibres (40, 50, 60, 80, 100 y 120) para aclarar los anillos de crecimiento y poder observarlos mejor.

Primero se utilizaron las lijas de calibre 40 y 50 con la finalidad de borrar las marcas de la motosierra, posteriormente las lijas de 60 y 80 para que los anillos se

observaran claramente. Por último se usaron las de calibre 100 y 120 para pulir más en la parte de la médula y al final de la rodaja, ya que es donde los anillos son más difíciles de diferenciar porque el crecimiento es menor.

Captura y procesamiento de datos

Una vez acondicionadas las rodajas de cada árbol, se escanearon usando un escáner Epson Twain Pro 32 bit Twain para la medición y el conteo de anillos de crecimiento. La captura y procesamiento de los datos se realizó utilizando los siguientes programas: WinDendro™ 2001b, Xlstem™ V1.3 (Gagnon y Morin, 2001), Statistical Analysis System versión 6.12 (SAS) y el Sigma Plot 2001 (versión 7.0).

En cada rodaja o sección se contabilizó el número de anillos, para obtener la edad a la cual el árbol llega a la altura de la sección.

La edad a cada sección se estimó con la siguiente ecuación:

$$\text{Edad a la altura de corte} = \text{Edad total} - n_a$$

Donde:

Edad total = número de anillos a 0.30 m + tiempo que tarda la especie en alcanzar los 0.30 m de altura (3 años)

n_a = número de anillos de la sección a la altura de corte.

Metodología para detección de árboles suprimidos

Con la finalidad de detectar los árboles suprimidos en las primeras etapas de desarrollo, se elaboró la siguiente metodología:

- a) Se construyeron los perfiles interiores de los 41 árboles muestra. Mediante una comparación visual de cada uno de ellos, se obtuvo una apreciación parcial de los árboles que fueron suprimidos (Apéndice 1).
- b) Se obtuvieron los incrementos corrientes anuales (ICA's) y medios anuales (IMA's) en diámetro a las edades de 5, 10, 15, 20 y 25 años, utilizando para esto la rodaja a la primer altura de corte (0.30 m) de cada uno de los árboles muestra. Posteriormente, los datos se ordenaron por localidad (1=Huajumbaro, 2=La Joya, 3=La Venta, 4=El Molcajete, 5=Rancho Los Coss, 6= San Antonio) y dentro de esta por número de árbol (Apéndice 2 y 3).
- c) Debido a que durante los recorridos de campo se observaron diferencias en productividad para cada una de las seis localidades, se decidió realizar una comparación de los datos por localidad.
- d) Se calculó la media y el error estándar de los valores de ICA e IMA para las categorías de edad de 5, 10, 15, 20 y 25 años por localidad. Para obtener un punto de comparación, se sumo y resto el valor del error estándar al valor de la media, obteniendo así una rango de valores para ésas categorías de edad (Apéndice 2 y 3).

e) Los criterios usados para comparar los árboles para cada localidad fueron los siguientes:

- 1) Se dio un punto a favor cuando el valor de ICA y/o IMA de cada edad estaba dentro o por arriba del rango de valores que se estimó para hacer la comparación, pudiéndose obtener un total de 10 puntos por árbol.
- 2) En los casos en los que los valores de ICA y/o IMA de las diferentes categorías de edad estaban por abajo del rango de comparación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.
 - Cuando el valor de ICA y/o IMA estaba muy por abajo (diferencia mayor a 0.2) del valor mínimo del rango de comparación se dio un punto en contra.

Por ejemplo:

	Rango de comparación
Valor máximo	0.6173
Valor mínimo	0.5254

Valor de ICA y/o IMA (0.2838), valor muy por abajo (diferencia mayor a 0.2)

- Cuando los valores de ICA y/o IMA estaban por abajo (diferencia menor a 0.1) con respecto del valor mínimo del rango de valores se dio un punto a favor.

Por ejemplo:

Rango de comparación

Valor máximo 0.6173

Valor mínimo 0.5254

Valor de ICA y/o IMA (0.4690), por abajo del rango (diferencia menor a 0.1)

- d) Se sumaron los puntos que obtuvo cada árbol (ICA e IMA), pudiéndose obtener un total de 10 puntos por árbol. Posteriormente los árboles que sumaron menos de tres puntos fueron los que se eliminaron.
- e) Por último, se hizo una comparación de la apreciación que se obtiene al ver los perfiles interiores de los árboles con respecto a la metodología descrita, anteriormente, y se observó que los resultados obtenidos son similares.
- f) En total no se incluyeron cinco árboles suprimidos de los 41 que se tenían inicialmente debido a la supresión detectada en los primeros 25 años.

Selección del modelo de crecimiento e incremento en altura utilizando el método anamórfico

Se probaron cinco modelos matemáticos (Cuadro 1) para describir el crecimiento en altura con base en el diagrama de dispersión de la relación edad-altura.

Cuadro 2. Modelos matemáticos probados para la estimación de la curva guía de *Pinus herrerae* Martínez en Cd. Hidalgo, Mich.

Nombre del modelo	Ecuación
Chapman – Richards	$A = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 E}\right)^{\beta_2}$
Gompertz	$A = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 E}}$
Logístico	$A = \frac{\beta_0}{\left(1 + e^{\beta_1 - \beta_2 E}\right)}$
Weibull	$A = 1 - e^{-\beta_0 E^{\beta_1}}$
Schumacher	$A = e^{\beta_0 + \beta_1 / E}$

A=altura; E=edad; β = parámetros; e= base natural de los logaritmos.
Fuente: Sit y Poulin-Costello (1994); Zamudio y Ayerde (1997).

La selección y prueba de los cinco modelos, se hizo para 36 árboles eliminando dos árboles con el programa de regresión no lineal que se fundamentó en la metodología propuesta por Sit y Poulin-Costello (1994) que consiste en:

a) Primeramente, se grafican los pares de valores de edad-altura (n=568) de los 34 árboles restantes para hacer un diagnóstico de su tendencia en un diagrama de dispersión.

b) Se compara el diagrama de dispersión con las diferentes formas de los cinco modelos, de acuerdo con los diferentes valores que sus parámetros pueden

adoptar. Se eligen los parámetros iniciales que se ajustarán a una curva lo más parecida al diagrama de dispersión.

c) Los parámetros del modelo definitivo se estiman mediante el procedimiento PROC NLIN del paquete estadístico SAS (Apéndice 4). Utilizando los diferentes métodos de ajuste (Gauss-Newton, Marquardt y Dud) que aplica el programa hasta encontrar convergencia.

d) La elección entre los modelos se fundamenta en los siguientes criterios: a) valor más bajo del cuadrado medio del error (CME), b) valor más alto del coeficiente de determinación (R^2), c) análisis de los residuales estudentizados (R-student), d) análisis gráfico de la fidelidad con que los modelos representaran los valores observados, trazando cada modelo sobre las observaciones y comparando su ajuste y e) si los modelos presentaron o no convergencia al momento de correr el programa en el paquete estadístico SAS (Sit y Poulin-Costello, 1994; Quiñones, 1995).

Dado que el procedimiento PROC NLIN del paquete estadístico SAS no proporciona el coeficiente de determinación este se calculó de la siguiente forma (Apéndice 5):

$$R^2 = 1 - (\text{sc residual} / \text{sc total})$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación.

sc residual= Suma de cuadrados residual.

sc total = Suma de cuadrados total.

Se procedió a realizar conjuntamente el ajuste de los modelos con el análisis de los residuales estudentizados de acuerdo a los propuesto por Alder (1980). Se graficaron a manera de representar los valores en un rango permisible de -2.5 a 2.5, lo que al mismo tiempo permitió detectar valores perdidos para descartarlos (Apéndice 6). En total, se descartaron 45 pares de valores de la relación edad-altura.

El propósito del análisis de los residuales fue para determinar cuándo los residuales confirman los supuestos del modelo, es decir, primero si están correlacionados, segundo si están normalmente distribuidos y tercero si tienen varianza uniforme. Además evaluar la falta de ajuste en el modelo por una tendencia sistemática de los residuales y examinar visualmente la forma de las relaciones entre los residuales.

Determinación del índice de sitio con base en el método anamórfico

Con el modelo elegido se estimó la curva de crecimiento en altura con la cual se calcularon los valores de incremento corriente y medio anual (ICA e IMA) para determinar una edad base a la cual se estimaron los índices de sitio. La edad base a utilizar fue aquella edad donde la curva del ICA se interceptó con la curva del IMA (Zepeda y Rivero, 1984).

Para la generación de las curvas de índice de sitio se utilizó el método de la curva guía propuesto por Clutter *et al.* (1983). Donde el parámetro β_0 es dependiente de la capacidad productiva del sitio, por lo que este parámetro es diferente en cada curva de índice de sitio. En este caso el crecimiento representado por $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ permanecen constantes.

Para la obtención de las curvas anamórficas de índice de sitio. Se realizó una serie de despejes del modelo de Chapman-Richards. Con la finalidad de obtener una ecuación independiente de β_0 y determinar la altura en función de la edad (Clutter *et al.* 1983; Quiñones, 1995).

La ecuación de Chapman-Richards es:

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

Donde:

A= Altura del árbol

e= base de los logaritmos naturales

E= edad del árbol

β_0, β_1 y β_2 parámetros a estimar.

Ajustando esta expresión a los datos se generó la curva guía. Cuando la edad (E) es igual a 32 años (edad base) y el valor de la altura es igual a 19.46 m, esta curva guía es la curva de índice de sitio promedio con un valor de 19.46 m a una edad base de 32 años.

Por otra parte, si la edad (E) se hace igual a la edad base (E_0), entonces la altura (A) será igual al índice de sitio (IS), es decir:

entonces:

$$IS = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 E_0}\right)^{\beta_2}$$

$$\beta_0 = IS \left(1 - e^{-\beta_1 E_0}\right)^{\beta_2}$$

Con esta ecuación se generan las curvas de crecimiento en altura para cada índice de sitio deseado. La ecuación es:

$$A = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E}}{1 - e^{-\beta_1 E_0}} \right]^{\beta_2}$$

Para la predicción del índice de sitio a partir de una altura y edad, se realizó el siguiente despeje del índice de sitio en lugar de la altura.

$$IS = A \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E_0}}{1 - e^{-\beta_1 E}} \right]^{\beta_2}$$

Equidistancia entre las curvas anamórficas de índice de sitio

La equidistancia entre las curvas de índices de sitio se determinó con base en los límites de confianza al 95% de los valores individuales, respecto a la curva guía y en función a la edad base (Apéndice 7).

Se utilizaron cinco clases de calidad de estación, cuya amplitud fue de 3 m, ya que clases con amplitudes menores resultarían problemáticas al tratar de estimar la calidad de sitio de un lugar (Zepeda y Rivero, 1984).

Con base en las curvas de los cinco índices de sitio se estimaron los valores de los ICA's e IMA's, para posteriormente, construir las curvas de dichos incrementos en apego a las calidades de estación.

Determinación del índice de sitio con base en el método polimórfico

Se utilizó el modelo de Chapman-Richards y el método de predicción de parámetros mencionado por Clutter *et al.* (1983), para generar curvas polimórficas de índice de sitio. Donde la altura es estimada con base en el índice de sitio y la edad. Se seleccionó el modelo de Chapman-Richards, debido a que se ha utilizado ampliamente en trabajos similares al presente estudio (Bojorges, 1990; Aguilar, 1991; Madrigal y Ramírez, 1995; Moreno, 1996; Franco, 2001) mostrando buenos ajustes en los estadísticos. Se consideró el tipo de ajuste por árbol, dado que en trabajos similares al presente estudio (Beck, 1971; Carmean, 1972;

Moreno, 1996) el mejor ajuste lo constituye el realizado por árbol. De manera que a continuación se describe la metodología de ajuste:

a) Se ajustó el modelo elegido a los datos de edad-altura por árbol. Para ello se utilizó el procedimiento PROC NLIN y el método de ajuste Gauss-Newton del paquete de análisis estadístico SAS (Apéndice 8).

b) Con el modelo elegido se estimó la curva de crecimiento en altura por árbol con la cual se calcularon los valores del incremento corriente y medio anual (ICA e IMA) para determinar una edad base. La edad base a utilizar fue aquella edad donde la curva del ICA se interceptó con la curva del IMA (Zepeda y Rivero, 1984). Por lo que, se obtuvo una base de datos que contenía los valores de B_0 , B_1 y B_2 y la edad base determinada por árbol. A la edad base determinada se estimó el índice de sitio mismo que se incluyó en dicha base de datos (Apéndice 9).

c) Se hizo el diagrama de dispersión de los parámetros (B_0 , B_1 y B_2) y sus valores de índice de sitio con el propósito de determinar después los valores de los nuevos parámetros B_0 y B_1 de una relación lineal entre los parámetros B_0 , B_1 y B_2 y sus índices de sitio obtenidos por cada árbol mediante regresión lineal (Apéndice 10).

Determinados los valores, las ecuaciones resultantes para el tipo de ajuste por árbol fueron las siguientes:

$$B_0 = B_0 + B_1 \text{ IS}$$

$$B_1 = B_0 + B_1 \text{ IS}$$

$$B_2 = B_0 + B_1 \text{ IS}$$

Donde B_0 , B_1 y B_2 fueron los parámetros reestimados e IS es el índice de sitio (Apéndice 9).

d) Los parámetros de la expresión original del modelo de Chapman-Richards fueron reemplazados por las ecuaciones obtenidas en el punto anterior, con lo que se incluyen en el modelo al índice de sitio y la edad como variables independientes.

e) La forma general de transformación se ejemplifica a continuación con el modelo de Chapman-Richards:

Expresión original del modelo:

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

Expresión reparametrizada:

$$A = f_1 \left[1 - e^{-f_2 E}\right]^{f_3}$$

Donde:

A = altura

E = edad

e = base de los logaritmos naturales

IS = índice de sitio

$$f_1 = B_0 = B_0 + B_1 IS$$

$$f_2 = B_1 = B_0 + B_1 IS$$

$$f_3 = B_2 = B_0 + B_1 IS$$

f) Con lo anterior se obtuvo una ecuación reparametrizada para el tipo de ajuste por árbol. Posteriormente, dicha expresión fue ajustada a la totalidad de los datos (n=593) altura-edad-índice de sitio de 36 árboles utilizando el procedimiento PROC NLIN y el método de ajuste Marquardt de SAS (Apéndice 11 y 12).

g) Se procedió a realizar el ajuste del modelo con el análisis de los residuales estudentizados de acuerdo a lo propuesto por Alder (1980). Se graficaron a manera de representar los valores en un rango permisible de -2.5 a 2.5, lo que permitió detectar valores perdidos para descartarlos (Apéndice 13). En total, se descartaron 42 valores de la relación altura-edad-índice de sitio.

La deficiencia más notable del modelo es que las alturas estimadas no coinciden exactamente con el valor del índice de sitio cuando ocurre a la edad base (Carmean, 1972) (Apéndice 14). Para corregir este desajuste que se observa en general en los modelos obtenidos con el método de predicción de parámetros, se utilizó el procedimiento propuesto por Carmean (1972); dicho procedimiento implica el cálculo de un factor de corrección, el cual es igual al cociente del valor

designado del índice de sitio dividido entre el valor estimado con el modelo (Apéndice 15). Dado que cada curva presenta desviaciones respecto del valor deseado, se calculó un factor para cada una.

Por último, con los factores calculados se corrigieron las alturas estimadas con el modelo para cada índice de sitio.

Equidistancia entre las curvas polimórficas de índice de sitio

Dado que en el presente estudio se estimó una edad base para cada árbol y no se contaba con una edad base estandarizada para todos los árboles, se obtuvo un promedio de dichas edades base el cual fue de 37.67 años, decidiendo fijar la edad base promedio definitiva a los 40 años.

La equidistancia entre las curvas de índice de sitio se determinó considerando el rango (de 15.5 a 29 m) de los valores de altura observados a la edad base promedio de 40 años (Apéndice 16). La equidistancia entre curvas de índice de sitio fue de 3 m, por lo que se obtuvieron cinco clases de calidad de estación, ya que clases con amplitudes menores resultarían problemáticas al tratar de estimar la calidad de estación de un lugar (Zepeda y Rivero, 1984).

Con base en las curvas de los cinco índices de sitio se estimaron los valores de los ICA's e IMA's, para posteriormente, construir las curvas de dichos incrementos con apego a las calidades de estación.

La discusión de los resultados obtenidos en este trabajo no se hizo siguiendo estrictamente el orden cronológico de los diferentes trabajos utilizados, sino que se hizo considerando, primero los trabajos hechos en la misma región de estudio, segundo con trabajos hechos en otras regiones pero dentro del estado de Michoacán y tercero, con trabajos hechos para regiones que están fuera del estado de Michoacán.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento en altura con el método anamórfico

Se eligió el modelo de Chapman-Richards, ya que presentó el valor más bajo del CME=7.48915 y el más alto valor del $R^2=0.98450$. Además, los residuales estudentizados presentaron una buena distribución y convergencia (Apéndice 6).

Otros modelos que también destacan son el de Gompertz y el de Schumacher por sus valores bajos del CME (7.72574 y 7.85885, respectivamente) y altos del R^2 (0.98401 y 0.98371, respectivamente), dichos valores son cercanos a los del modelo seleccionado. Otro modelo probado fue el de Weibull, el cual fue descartado al no presentar convergencia.

Los modelos de Schumacher y Chapman-Richards se han utilizado ampliamente en trabajos similares (Aguilar, 1991; Quiñones, 1995; Madrigal y Ramírez, 1995; Moreno, 1996; Franco, 2001) al presente estudio debido a sus mejores ajustes.

Sin embargo, un buen ajuste no necesariamente indica que el modelo representa la forma general de la relación entre la altura y la edad (Quiñones, 1995; Franco, 2001). Por lo que, al sobreponer los valores observados de la edad y la altura con el ajuste de los cuatro modelos probados (Figura 2), el modelo de Schumacher subestima la altura de los 2 a los 10 años iniciales y sobrestima la altura en las edades de 84 a 110 años. Los modelos de Gompertz y el Logístico

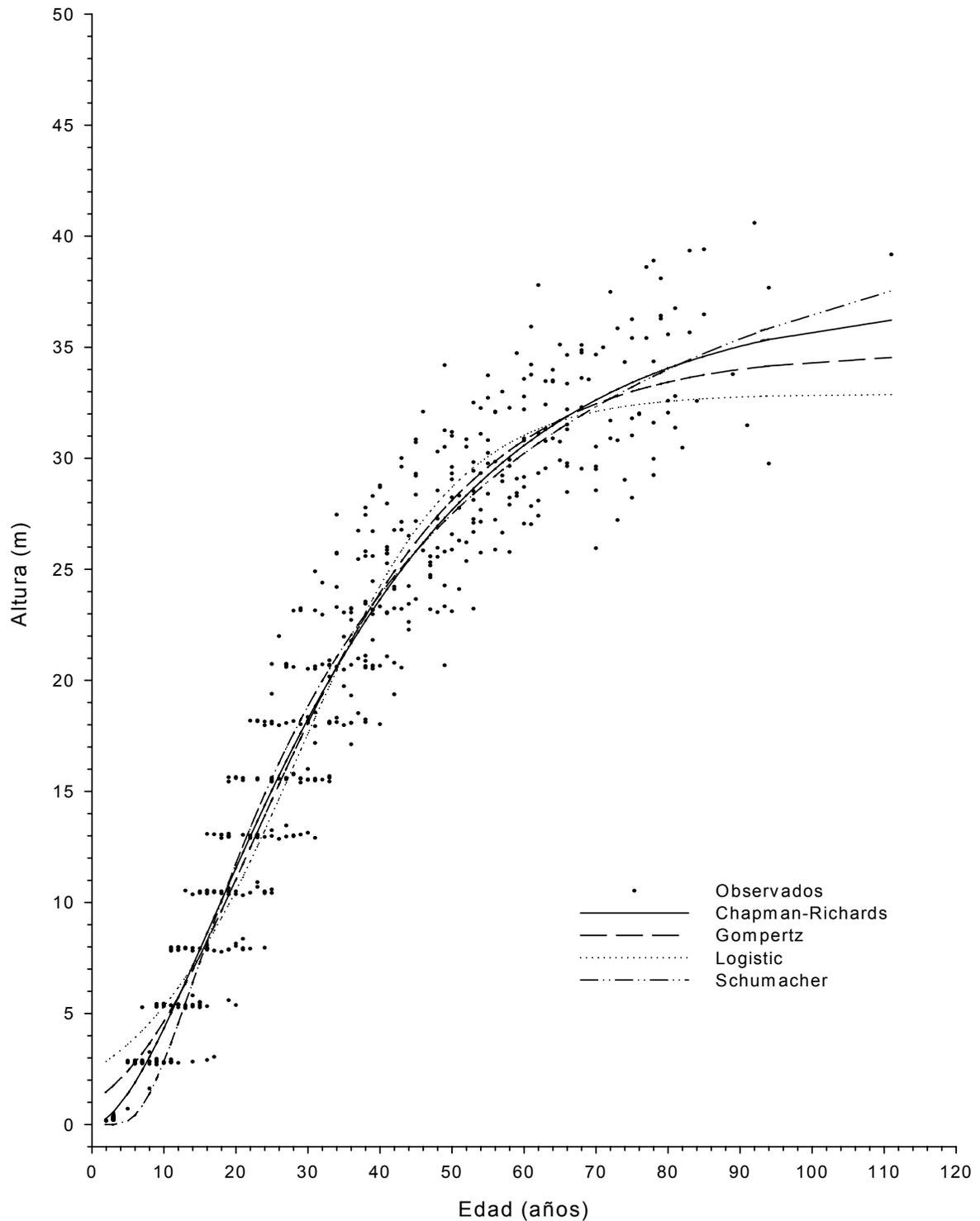


Figura 2. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura y el ajuste de los modelos Chapman-Richards, Gompertz, Logístico y Schumacher, para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

sobrestiman la altura en las edades de 2 a 10 años y subestiman la altura en las edades de 84 a 110 años. En cambio, el modelo de Chapman-Richards se mantiene por en medio del diagrama de dispersión y de los modelos de Gompertz, Logístico y Schumacher a lo largo del crecimiento en altura de *Pinus herrerae* (Figura 2).

Para una edad de 90 años los modelos probados predicen diferentes valores de altura. El modelo de Chapman-Richards estima un valor de altura de 34.96 m manteniendo una diferencia por arriba de 1.0 y 2.21 m con respecto a los modelos de Gompertz y Logístico, en ese orden, y 0.29 m por debajo de la altura estimada por el modelo de Schumacher. El modelo de Chapman-Richards representa en forma más adecuada la tendencia de los valores observados (Figura 2).

La curva de crecimiento en altura es de forma cóncava durante los primeros 10 años representando un crecimiento lento (Figura 3), luego presenta un rápido crecimiento hasta llegar a los 32 años representando una curva de mayor pendiente, edad a la cual se presenta el punto de inflexión y el máximo crecimiento en altura con 0.61 m año^{-1} . Por último, a partir de esta edad la curva adquiere una forma convexa hasta llegar a los 60 años a una altura de 30.58 m, posteriormente, el ritmo de crecimiento en altura se hace más lento tendiendo a estabilizarse conforme aumenta la edad (Figura 3).

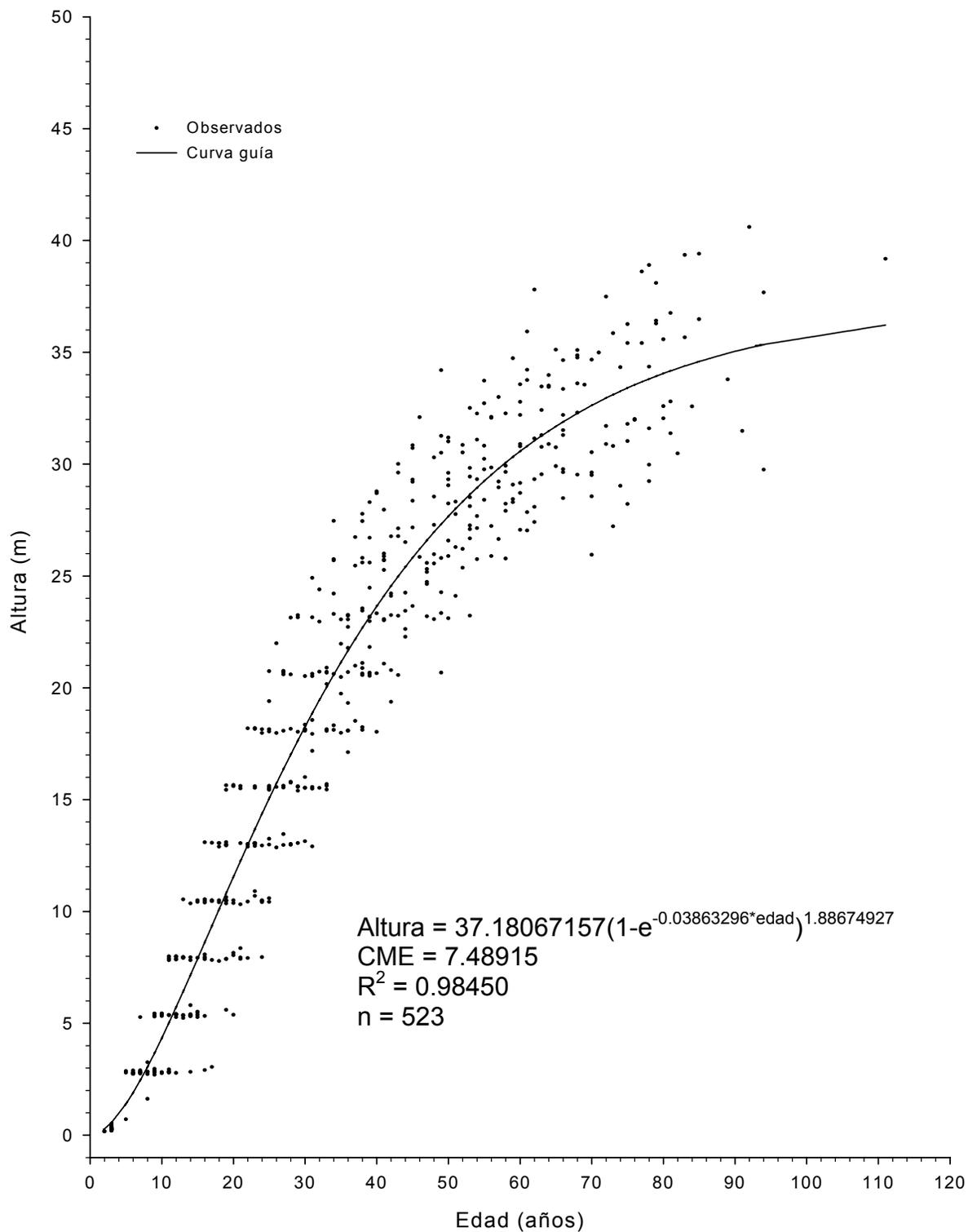


Figura 3. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura y ajuste del modelo Chapman-Richards para *Pinus herrerae* Martínez en la región Cd. Hidalgo, Mich.

Crecimiento en altura con el método polimórfico

Los resultados del análisis de regresión no lineal mostraron un buen ajuste del modelo de Chapman-Richards, esto por sus valores bajos del CME=7.91581 y altos del $R^2=0.98315$, dichos valores son muy cercanos a los del modelo seleccionado en el proceso anamórfico (CME=7.48915; $R^2=0.98450$). Además los residuales estudentizados presentaron una buena distribución (Apéndice 12).

De acuerdo con Beck (1971), las diferencias de ajuste, que se pueden observar en el ajuste por árbol o por sitio, se deben a las fuentes de variación consideradas en uno y otro caso. El autor analizó las contribuciones de diferentes fuentes de variación a la varianza total, encontrando que la varianza atribuida a las observaciones por árbol fue menor a la atribuida a las observaciones de árboles dentro de rodales, rodales dentro de clases de sitio y observaciones por clases de sitio.

Finalmente, el modelo obtenido para predecir la altura en función del índice de sitio y la edad es el siguiente:

$$A = (15.4165 + 1.0044IS) [1 - e^{-(0.0841 - 0.0020IS)E}]^{2.5709 - 0.0283IS}$$

Donde:

A = altura

E = edad

IS = índice de sitio

e = base de los logaritmos naturales

Algunas de las propiedades de esta ecuación son las siguientes: 1) a una edad cero se tiene una altura cero, 2) los valores asintóticos son dependientes del índice de sitio y 3) las tasas de crecimiento son dependientes del índice de sitio. Estas propiedades son deseables en cualquier sistema de curvas de índice de sitio (Devan y Burkhart, 1982). La primera propiedad es necesaria por razones obvias. La segunda indica que los árboles alcanzarán una altura máxima (asintota) mayor en sitios de alta calidad que aquellos ubicados en sitios de baja calidad, mientras que la última propiedad garantiza el polimorfismo del sistema de curvas (Apéndice 13).

Moreno (1996) realizó un estudio para determinar el índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región de Hidalgo-Zinapécuaro, Mich., mediante análisis troncales de 51 árboles dominantes constituyendo una base de datos de 920 pares de valores de la relación edad-altura. El autor utilizó los métodos de la predicción de parámetros y de la diferencia algebraica, así como los modelos de Chapman-Richards y Schumacher en su versión polimórfica. El autor realizó el ajuste por árbol y por sitio, encontrando que con el método de la predicción del parámetro y usando el modelo de Chapman-Richards obtuvo un ajuste estadístico aceptable al presentar un $R^2=0.979$ y una mejor representación de los valores observados. La metodología de ajuste para la selección de modelos que utilizó

Moreno (1996) es diferente a la usada en el proceso anamórfico del presente estudio, pero los valores obtenidos en los estadísticos son similares, además de que el modelo seleccionado es el mismo que se seleccionó en este trabajo, dados sus buenos ajustes estadísticos.

Al comparar los resultados obtenidos por Moreno (1996) con los obtenidos en las curvas polimórficas de este estudio, se tiene que el modelo y el método de ajuste utilizados por este autor son iguales a los usados en el presente trabajo, además los valores obtenidos en los estadísticos son muy parecidos, esto a pesar de que el tamaño de muestra utilizado por Moreno (1996) (n=920 pares de valores) es mayor al utilizado en el presente trabajo (n=551 pares de valores). Cabe mencionar que a diferencia del trabajo de este autor, en el presente sólo se consideró el ajuste realizado por árbol.

Franco (2001) determinó el índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Mich. con análisis troncales de 28 árboles constituyendo una base de datos de 268 pares de valores. El autor utilizó el método de la curva guía con el que probó los modelos de crecimiento de Schumacher, Chapman-Richards y Gompertz, determinando que el mejor modelo para describir el crecimiento en altura fue el de Chapman-Richards con un $R^2=0.87$. Cabe mencionar que el modelo de Gompertz fue el que presentó mejor ajuste estadístico con un $R^2=0.87$ pero sobrestimaba la altura en los primeros diez años. La metodología de ajuste para la selección de modelos usada por este autor es igual a la utilizada en el proceso anamórfico de este trabajo, pero el ajuste

estadístico es diferente, dado que el tamaño de muestra (n=268 pares de valores) utilizado por ese autor es menor al utilizado en el presente estudio (n=523 pares de valores).

Por otra parte, en otras regiones dentro del estado de Michoacán, en las que se determinaron los índices de sitio o calidad de estación, Aguilar y Aguilar (1991) realizaron un estudio para la determinación de la calidad de estación para *P. pseudostrobus* Lindl. y Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb., *P. lawsonii* Roetzl., *P. leiophylla* Schl. et Cham., y *P. michoacana* Martínez en los bosques de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich., para lo cual utilizaron la información de la relación edad-altura de 5176 árboles muestra distribuidos en más de 5000 sitios de muestreo, dicha información la obtuvieron con el uso del taladro de Pressler y un clinómetro. El tamaño de muestra utilizado por especie fue de 2989, 428, 135, 1158 y 465 pares de valores, respectivamente. Los autores emplearon la fórmula española para describir el crecimiento en altura, la cual nunca había sido utilizada en México, utilizando la técnica de regresión y correlación simple. Los autores obtuvieron buenos coeficientes de correlación ($r=0.96$, 0.94 , 0.98 , 0.94 y 0.97 , respectivamente). Sin embargo, a pesar de tal ajuste, Aguilar y Aguilar (1991) afirman que el modelo empleado por ellos no hace una buena descripción de la tendencia del crecimiento en altura, como sería la proveniente de los análisis troncales.

La metodología para la obtención de la base de datos empleada por Aguilar y Aguilar (1991) es diferente a la forma en que se obtuvo en el presente

estudio, además de que el modelo probado ha tenido poca o nula aplicación para describir el crecimiento en altura, concluyendo ellos mismos que la metodología utilizada en su trabajo sólo ofrece resultados parciales.

A su vez, Madrigal y Ramírez (1995) realizaron la comparación de nueve modelos empíricos para la determinación del índice de sitio de *P. douglasiana* Martínez y *P. lawsonii* Roetzl., en el campo Experimental Barranca de Cupatitzio, Uruapan, Mich., mediante el análisis troncal de 40 árboles, 20 por especie. Los autores probaron los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull, con los que probaron las metodologías de la curva guía y de la diferencia algebraica, y con esta última, los tipos anamórficos y polimórficos. Los autores determinaron que utilizando el método de la curva guía, el modelo con mejor bondad de ajuste fue el de Schumacher al presentar un $R^2=0.746$ para la primera especie y un $R^2=0.625$ para la segunda. Con relación a la metodología de la diferencia algebraica, el modelo con mejor bondad de ajuste fue el polimórfico de Schumacher al presentar un $R^2=0.972$ para la primera especie y un $R^2=0.975$ para la segunda, siendo éste el mejor modelo para describir el crecimiento en altura para las dos especies. Al comparar los resultados obtenidos por estos autores utilizando el método de la curva guía se encontró que el modelo de Chapman-Richards obtuvo un ajuste estadístico deficiente en comparación con el que obtuvo en el presente estudio, ya que Madrigal y Ramírez (1995) reportan valores del R^2 más bajos.

También, al comparar los resultados obtenidos en este estudio, utilizando el método de predicción de parámetros, con los obtenidos por Madrigal y Ramírez (1995) usando el método de la diferencia algebraica, se tiene que el modelo de Chapman-Richards muestra un R^2 que es más alto al mostrado en el trabajo de dichos autores.

Asimismo, para otras regiones diferentes a la de Cd. Hidalgo y fuera del estado de Michoacán, Benavides y Manzanilla (1993) realizaron un estudio sobre calidad de sitio en el Área Demostrativa Forestal, Tapalpa, Jal., utilizando los análisis troncales de 31 árboles, 25 para *P. michoacana cornuta* Martínez y 6 para *P. oocarpa* Schiede. Los autores utilizaron el modelo de Schumacher por ser de configuración sencilla y de fácil manejo, la metodología de ajuste para las curvas de índice de sitio fue de acuerdo a lo propuesto por Bailey y Clutter (1974). El sistema de curvas construido por estos autores fue de tipo polimórfico para lo cual usaron el método de edad invariante, el ajuste del modelo los realizaron mediante el uso de un parámetro "K" mismo que fue determinado por aproximaciones; el valor de "K" que resultó ser el mejor para la primera especie fue de 0.33 por obtener un $R^2=0.876355$ y para la segunda especie el valor de "K" fue de 0.19 por obtener un $R^2=0.9117$.

Los resultados obtenidos por Benavides y Manzanilla (1993) son difíciles de comparar con los obtenidos en los procesos anamórfico y polimórfico del presente estudio, ya que estos autores utilizaron una metodología de ajuste muy diferente a las utilizadas en este estudio, además los autores únicamente probaron

un modelo y una metodología de ajuste, los valores de los estadísticos que obtuvieron al ajustar este modelo fueron más bajos respecto a los valores obtenidos en el presente estudio. Es importante, hacer notar que al no probar diferentes metodologías para seleccionar la que de mejor ajuste, es difícil de asegurar que la metodología y el modelo empleados sean los adecuados para describir el crecimiento en altura de las especies en cuestión.

Igualmente, en regiones aún más distantes a Cd. Hidalgo, Mich., Arteaga *et al.*, (1988) determinaron el índice de sitio (IS) para *P. patula* Schl. *et* Cham., en la región de Chignaguapan-Zacatlán, Pue., a partir de análisis troncales de 250 árboles constituyendo una base de datos de 3403 pares de valores de la relación edad altura. Los autores utilizaron la metodología sugerida por Aguirre (1984) para el ajuste de las curvas de IS, así como la ecuación de Richards modificada $A = B_0 IS^{B_1} (1 - e^{-B_2 E})^{B_3} IS^{B_4}$ para describir el crecimiento en altura que presentó un $R^2=0.98$ con la cual generaron un sistema de curvas de tipo polimórfico. El estudio realizado por estos autores, se diferencia respecto al proceso polimórfico del presente trabajo, en que dichos autores utilizaron una metodología de ajuste diferente a la usada en este estudio, además de que el modelo empleado por estos autores ha tenido poca aplicación para describir el crecimiento en altura, ya que su principal problema es el de cómo fijar los valores iniciales de los parámetros. Cabe mencionar, que a pesar de que el número de muestra que utilizaron Arteaga *et al.*, (1998) es mayor al utilizado en el presente estudio, los valores de los estadísticos que obtuvieron al ajustar la ecuación de Richards modificada, son similares a los valores que se obtuvieron en los procesos

anamórfico y polimórfico de este estudio. También, es importante señalar que al probar únicamente un modelo y una metodología de ajuste, estos autores no tuvieron un criterio amplio para la selección de modelos, como se tuvo en el presente estudio y con el cual hubiesen podido mejorar el ajuste y describir mejor el crecimiento en altura.

Similarmente, Monroy (1996) determinó el índice de sitio para *P. patula* Schl. et Cham., en la región de Huayacocotla, Ver., mediante análisis troncales de 72 árboles dominantes, para lo cual utilizó el método de la curva guía, así como el modelo de Schumacher para describir el crecimiento en altura el cual presentó un $R^2=0.77$. Al comparar los resultados obtenidos por este autor con los obtenidos en el presente estudio, se encontró que el tamaño de muestra que utilizó Monroy (1996) es mayor al utilizado en este estudio, la diferencia radica en que ese autor sólo probó un modelo y una metodología de ajuste y que a pesar de que el tamaño de muestra fue mayor, los valores de los estadísticos que obtuvo al ajustar este modelo son más bajos respecto de los valores que se obtuvieron en los procesos anamórfico y polimórfico del presente trabajo.

Sánchez y Del Castillo (2001) determinaron la calidad de estación para *P. chiapensis* (Mart.) Andresen, en el Rincón, Oax., utilizando la información de la relación edad-altura de 210 árboles dominantes y codominantes, distribuidos en 44 sitios de muestreo, dicha información la obtuvieron con el uso del taladro de Pressler y un clinómetro. Los autores ordenaron la base de datos logarítmicamente por categoría de edad utilizando la metodología aplicada por

Maldonado (1984) y para obtener la ecuación de índice de sitio por regresión lineal probaron modelos en los que las variables tomaron las modalidades lineal, logarítmica, cuadrática e inversa. Estos autores trazaron con el modelo de mejor ajuste ($A^{-1} = 0.0316 + 5.1393E^{-2}$; $R^2=0.981$) la curva de índice de sitio medio sobre un gráfico de dispersión de los valores de edad y altura, los puntos que estuvieron por arriba de la curva se ordenaron y procesaron de la forma antes mencionada para obtener la curva de índice de sitio alto ($A^{-1} = 0.0263 + 4.7354E^{-2}$; $R^2=0.981$), así mismo con los puntos que estuvieron por debajo obtuvieron la curva de índice de sitio bajo ($A^{-1} = 0.0388 + 6.3742E^{-2}$; $R^2=0.998$), correspondiendo este método al de curvas polimórficas empleado por Brickell (1968).

Los resultados obtenidos por Sánchez y del Castillo (2001) respecto al proceso polimórfico del presente trabajo, son muy difíciles de comparar, ya que estos autores utilizaron una metodología diferente para obtener la base de datos, además la metodología de ajuste es muy diferente a la que se utilizó en este estudio. A su vez, es importante señalar que los modelos probados por estos autores han tenido muy poca aplicación para describir el crecimiento en altura por lo que la metodología utilizada por estos autores sólo ofrece resultados parciales, al igual que los trabajos realizados por De la Fuente (1985) y Aguilar y Aguilar (1991).

Curvas de incrementos corriente y medio anual en altura con base en el método anamórfico

El ICA presenta un crecimiento rápido desde los primeros cinco años con un incremento inicial de 0.28 m año^{-1} , alcanzando su máximo valor (0.732 m año^{-1}) a la edad de 20 años (Figura 4). A partir de esta edad decrece en forma rápida hasta llegar a los 80 años. Después esta tendencia se hace menos pronunciada. El IMA aumenta lentamente, desde los primeros cinco años con un incremento inicial de 0.28 m año^{-1} hasta los 30 años en donde alcanza su máximo valor de incremento (0.61 m año^{-1}), la curva decrece después de interceptar a la curva del ICA, con una pendiente más suave. La edad base elegida fue de 32 años (Figura 4).

Curvas anamórficas de índice de sitio

Se generaron cinco curvas anamórficas de índice de sitio correspondientes a los índices de sitio de 25.46, 22.46, 19.46, 16.46 y 13.46 m con una amplitud de 3 m a la edad base de 32 años (Figura 5 y Cuadro 3).

Los valores de altura para cada índice de sitio y sus incrementos se presentan de 5 en 5 años hasta 115 años, la cual fue la edad máxima observada (Cuadro 3). De esta manera se conforma una familia de cinco curvas anamórficas que representan cinco calidades de estación I, II, III, IV y V, respectivamente (Cuadro 4).

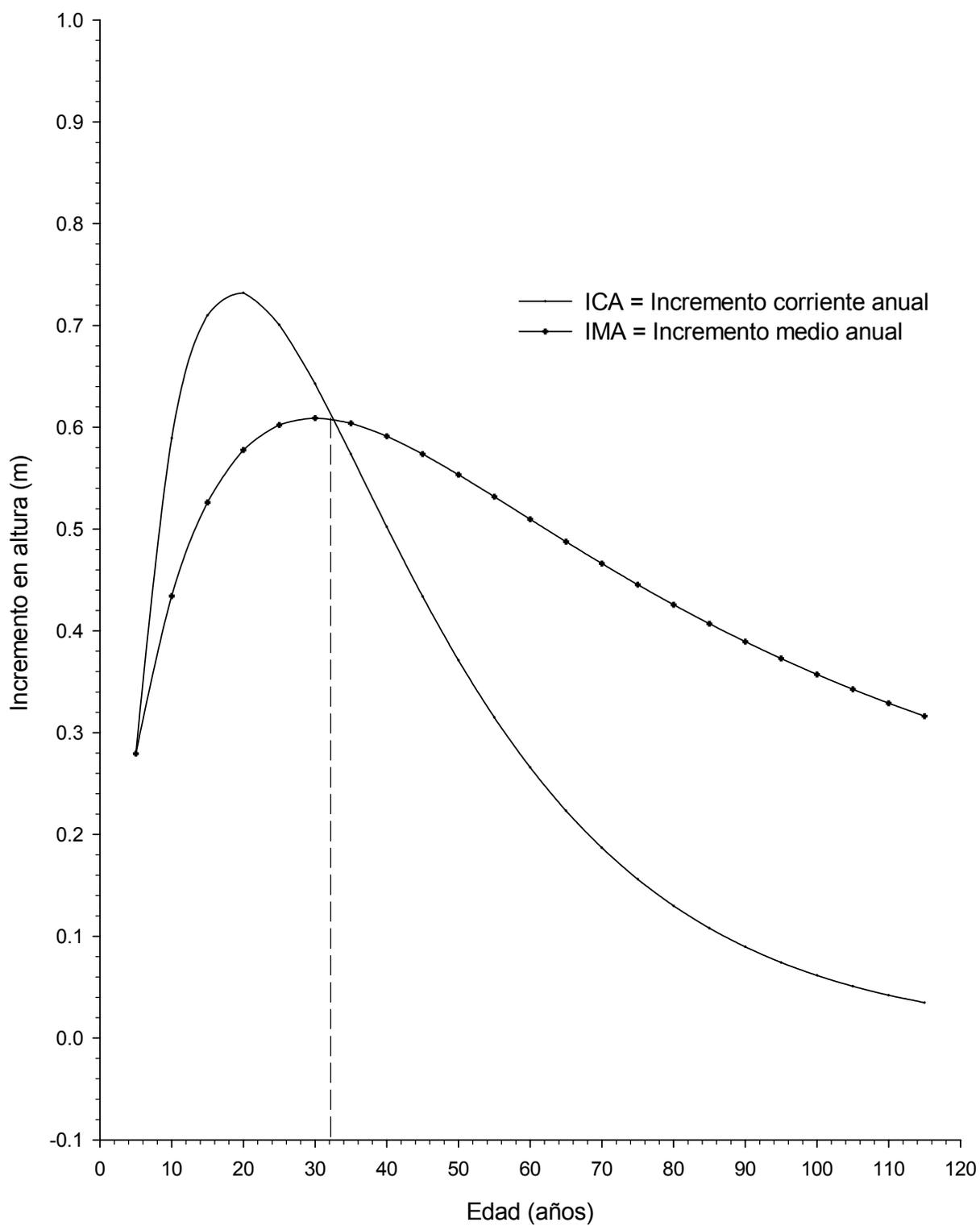


Figura 4. Curvas de incremento en altura y edad base de 32 años para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

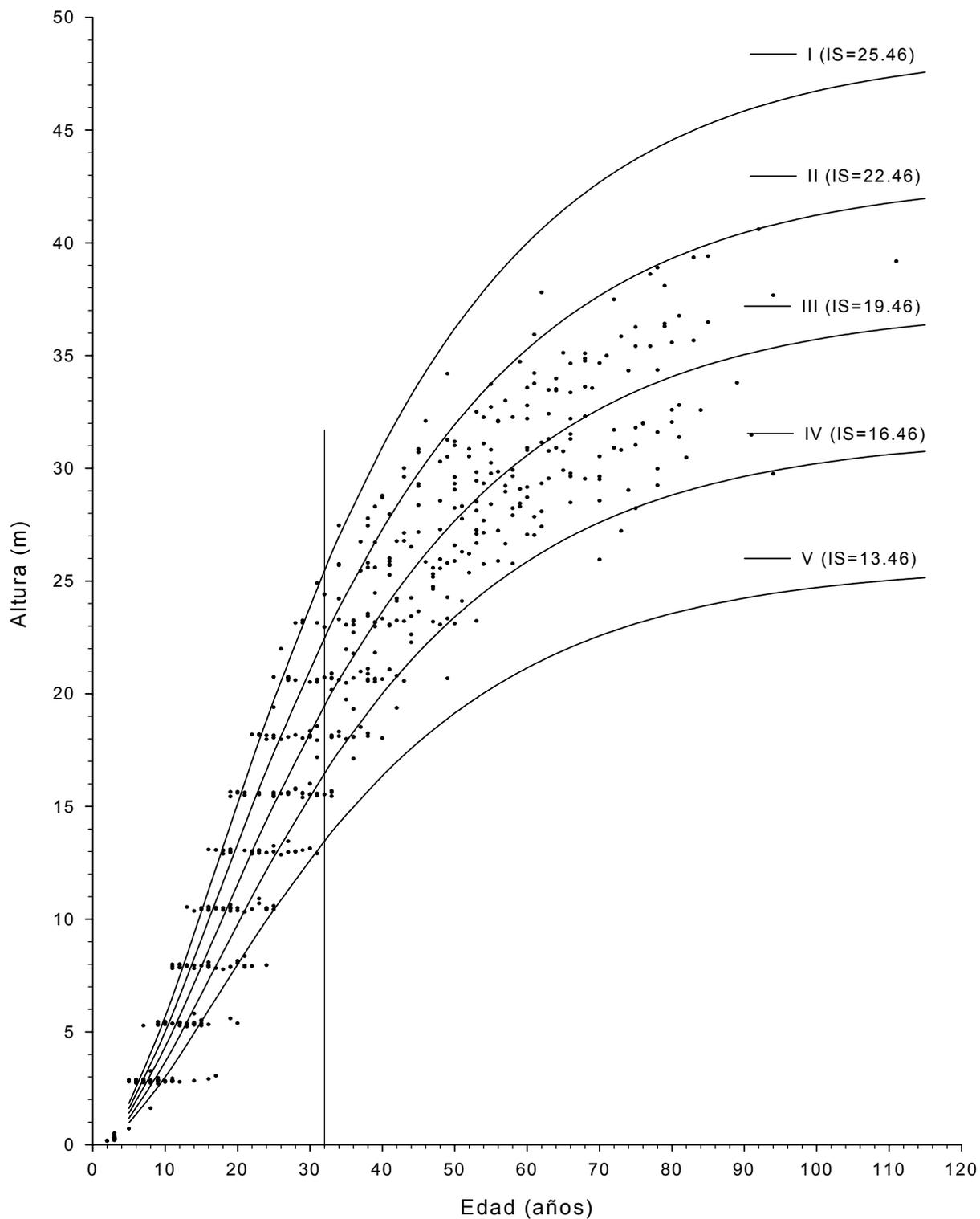


Figura 5. Curvas anamórficas de índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez a una edad base de 32 años, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Cuadro 3. Altura estimada por edad e índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Edad (años)	Índice de sitio en (m)				
	14	17	20(guía)	23	26
5	0.97	1.18	1.40	1.61	1.83
10	3.00	3.67	4.34	5.01	5.68
15	5.46	6.68	7.89	9.11	10.33
20	7.99	9.77	11.55	13.33	15.12
25	10.41	12.74	15.06	17.38	19.70
32	13.46	16.46	19.46	22.46	25.46
35	14.62	17.88	21.14	24.40	27.65
40	16.36	20.00	23.65	27.29	30.94
45	17.86	21.84	25.82	29.80	33.78
50	19.14	23.41	27.67	31.94	36.20
55	20.23	24.74	29.25	33.76	38.26
60	21.15	25.86	30.58	35.29	40.00
65	21.92	26.81	31.69	36.58	41.46
70	22.57	27.60	32.63	37.66	42.69
75	23.11	28.26	33.41	38.56	43.71
80	23.56	28.81	34.06	39.31	44.56
85	23.93	29.26	34.60	39.93	45.26
90	24.24	29.64	35.04	40.45	45.85
95	24.50	29.95	35.41	40.87	46.33
100	24.71	30.21	35.72	41.23	46.74
105	24.88	30.43	35.98	41.52	47.07
110	25.03	30.61	36.19	41.77	47.34
115	25.15	30.75	36.36	41.97	47.57

Cuadro 4. Calidad de estación e índice de sitio de *Pinus herrerae* Martínez a una edad base de 32 años la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Condición	Calidad de estación	Índice de sitio (m)	Amplitud del IS (m)
Muy Buena	I	25.46	23.96-26.96
Buena	II	22.46	20.96-23.96
Regular	III	19.46	17.96-20.96
Mala	IV	16.46	14.96-17.96
Muy mala	V	13.46	11.96-14.96

La curva guía (IS=19.46 m) alcanza una altura máxima de 36.36 m a una edad base de referencia de 32 años, mientras que las demás curvas presentan menores o mayores alturas proporcionales a dicha curva con intervalos de 3 m (Figura 5). Las áreas de mayor calidad de sitio (IS=25.46 m) presentan crecimientos que superan con 22 metros a la peor calidad de sitio (IS=13 m), a la edad de 115 años.

Curvas polimórficas de índice de sitio

Se generaron cinco curvas polimórficas de índice de sitio correspondientes a los índices de sitio de 15.5, 18.5, 21.5, 24.5 y 27.5 m con una amplitud de tres metros a la edad base promedio de 40 años, siendo esta edad 8 años mayor con respecto a la determinada en el proceso anamórfico (Cuadro 5).

Los valores de altura para cada índice de sitio y sus incrementos se presentan de 5 en 5 años hasta 135 años, la cual fue la edad máxima observada (Cuadro 5). De esta manera se conforma una familia de cinco curvas polimórficas de índice que representan cinco calidades de estación I, II, III, IV y V, respectivamente (Cuadro 6 y Figura 6).

Cuadro 5. Altura estimada (corregida) por edad e índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Edad	Índice de sitio en (m)				
(años)	16	19	22	25	28
5	0.91	1.05	1.19	1.33	1.47
10	3.05	3.47	3.84	4.19	4.51
15	5.64	6.41	7.10	7.71	8.27
20	8.20	9.39	10.46	11.44	12.32
25	10.52	12.16	13.68	15.09	16.39
30	12.50	14.62	16.62	18.53	20.33
35	14.16	16.73	19.23	21.68	24.05
40	15.50	18.50	21.50	24.50	27.50
45	16.57	19.97	23.44	27.00	30.65
50	17.43	21.17	25.08	29.19	33.50
55	18.10	22.15	26.47	31.10	36.06
60	18.62	22.94	27.62	32.74	38.36
65	19.03	23.58	28.59	34.16	40.39
70	19.34	24.09	29.38	35.37	42.20
75	19.59	24.49	30.04	36.41	43.79
80	19.78	24.82	30.58	37.29	45.19
85	19.92	25.08	31.03	38.04	46.42
90	20.04	25.28	31.39	38.67	47.50
95	20.12	25.45	31.69	39.21	48.45
100	20.19	25.58	31.94	39.67	49.28
105	20.24	25.68	32.14	40.05	50.00
110	20.28	25.76	32.31	40.38	50.63
115	20.31	25.83	32.44	40.65	51.18
120	20.33	25.88	32.55	40.88	51.65
125	20.35	25.92	32.64	41.08	52.07
130	20.37	25.95	32.72	41.24	52.43
135	20.38	25.98	32.78	41.38	52.75

Analizando el modelo utilizado desarrollado bajo el método de predicción de parámetros, se observa que representa en forma adecuada la tendencia de los valores observados (Figura 6). Además de lo anterior, las curvas muestran un polimorfismo evidente (Figura 6 y Apéndice 14) y tienden a valores asintóticos diferentes para cada índice de sitio.

Cuadro 6. Calidad de estación e índice de sitio de *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Condición	Calidad de estación	Índice de sitio (m)	Amplitud del IS (m)
Muy Buena	I	27.5	26-29
Buena	II	24.5	23-26
Regular	III	21.5	20-23
Mala	IV	18.5	17-20
Muy mala	V	15.5	14-17

La curva correspondiente al índice de sitio de 21.5 m alcanza una altura máxima de 32.78 m a una edad base de referencia de 40 años, mientras que las otras curvas presentan menores o mayores alturas proporcionales a dicha curva con intervalos de tres metros (Figura 6). Las áreas de mayor calidad de sitio (IS=27.5 m) presentan crecimientos que superan con 32 m a la peor calidad de sitio, a la edad de 135 años.

En la mayor parte de los estudios sobre estimación de los índices de sitio o calidad de estación, se ha utilizado una edad base que es superior a los 40 años (Bojorges, 1990; Aguilar y Aguilar, 1991; Benavides, 1991; Benavides y Manzanilla, 1993; Madrigal y Ramírez, 1995; Aguilar, 1997), en dichos estudios la edad base elegida considera el máximo incremento medio anual en altura, que corresponde a un valor cercano al turno técnico. Lo anterior hace que exista una diferencia al comparar la edad base obtenida en el presente trabajo con la obtenida por otros autores (Zepeda y Rivero, 1984).

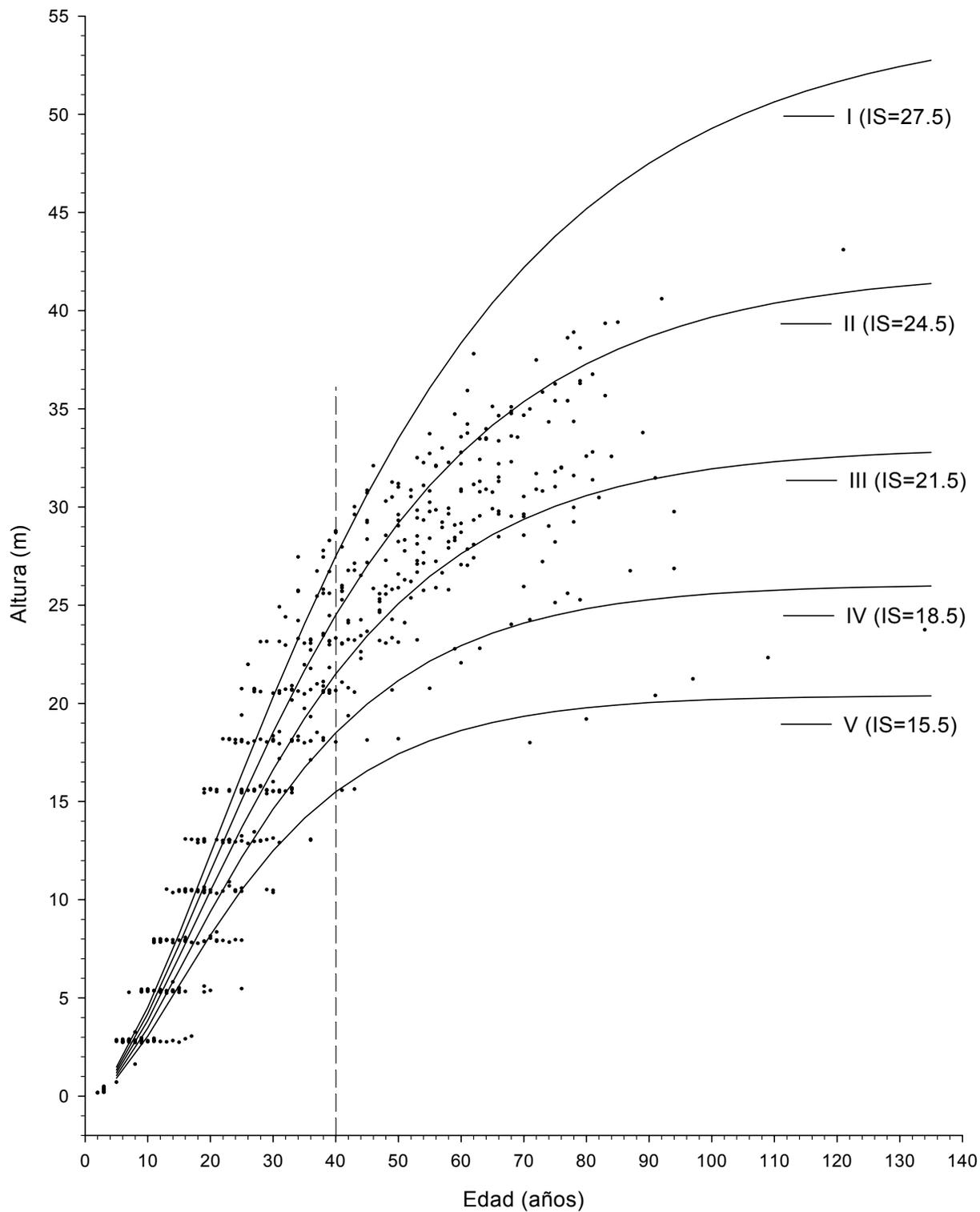


Figura 6. Curvas polimórficas de índice de sitio (corregidas) para *Pinus herrerae* Martínez a una edad base promedio de 40 años, en la región Cd. Hidalgo, Mich.

Moreno (1996) utilizando el modelo de Chapman-Richards para describir el crecimiento en altura, usó una edad base de 50 años, la cual el autor comenta que es cercana al turno técnico en la región Hidalgo-Zinapécuaro de Michoacán, con la que generó cinco curvas de índice de sitio a una equidistancia de tres metros. La edad base que utilizó este autor fue más alta que las que se determinaron para los procesos anamórfico (32 años) y polimórfico (40 años) del presente trabajo, además dicho autor no explica como se determinó la equidistancia entre las curvas de índice de sitio que estimó, sino que sólo utiliza la amplitud de tres metros sin considerar los límites de confianza de los valores individuales como se hizo en el proceso anamórfico del presente estudio.

A su vez, Franco (2001) al utilizar el modelo anamórfico de Chapman-Richards para describir el crecimiento en altura, determinó una edad base de 25 años, con la que generó cinco curvas de índice de sitio a una equidistancia de tres metros. Cabe destacar dos cosas: a) la edad base que utilizó este autor fue menor a las que se determinaron en el presente estudio y b) que utilizó el rango de dispersión de los valores de altura a la edad base para determinar la equidistancia entre curvas de índice de sitio.

Por otra parte, Aguilar y Aguilar (1991) utilizaron la fórmula española $A = (E / B_0 + B_1E)^2$ la cual no había sido utilizada en México. Los autores determinaron que el mejor funcionamiento de las curvas de índice de sitio se encuentra entre los 40 y 60 años para todas las especies y calcularon cuatro curvas de calidad de estación por especie a equidistancias variables entre curvas de 2, 4, 5, 5 y 6 m

para *P. lawsonii*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla*, respectivamente. Resulta difícil de hacer la comparación de los resultados obtenidos por estos autores, ya que no mencionan cual es la edad base que utilizaron, sólo comentan los años en los que las curvas de índice de sitio tienen el mejor funcionamiento, además dichos autores no explican como se determinó la equidistancia entre las curvas de índice de sitio que estimaron para cada una de las especies.

García *et al.* (1996) estimaron los índices de sitio para una plantación de *Pinus herrerae* en Coalcomán, Mich., con información obtenida de análisis troncales. Los autores generaron tres curvas polimórficas de índice de sitio (IS=20, 21.5 y 23 m) a una equidistancia de 1.5 m, utilizaron una edad de 24.2 años, la cual corresponde al tiempo que tiene de establecida la plantación. El modelo utilizado por dichos autores fue $\text{Ln}H_0 = B_0 / (1/X)^{B^2}$ el cual presentó un buen ajuste con un $R^2 = 0.97$, pero no reportan el número de árboles utilizados para generar dichas curvas. Cabe mencionar que la plantación se estableció en 1963 con plántulas de regeneración natural de 1 a 2 años de edad, las cuales fueron extraídas de áreas cercanas a Dos Aguas, Mich.

Para otras regiones diferentes a Cd. Hidalgo, Mich., en las que se determinaron los índices de sitio, Benavides y Manzanilla (1993) utilizaron el modelo de Schumacher por ser de configuración sencilla y de fácil manejo, además utilizaron una edad base de 45 años para las dos especies, misma que utilizaron para generar tres curvas de índice de sitio para cada especie, a una

equidistancia de seis metros. Al comparar el estudio realizado por Benavides y Manzanilla (1993) respecto de los procesos anamórfico y polimórfico del presente estudio, se encontró que la edad base utilizada por estos autores fue más alta que las determinadas en el presente estudio, además esta no fue determinada por medio de la intercepción de los incrementos. Estos autores utilizaron los valores extremos máximos y mínimos para determinar la equidistancia entre curvas.

Por otra parte, Arteaga *et al.* (1988) utilizando la ecuación de Richards modificada $A = B_0 IS^{B^1} (1 - e^{B^2 E})^{B^3} IS^{B^4}$ para describir el crecimiento en altura, utilizaron una edad base de 35 años con la que generaron cinco curvas de índice de sitio a una equidistancia de cuatro metros. La edad base que utilizaron estos autores es muy cercana a las que se determinó en el presente estudio, pero la diferencia entre estudios es que Arteaga *et al.* (1988) no hacen mención de cómo se determinó la edad base, además la equidistancia entre curva fue un metro más alta que la que se utilizó en este estudio, lo cual permite tener un criterio más amplio al momento de asignar los índices de sitio. Para determinar la equidistancia entre curvas los autores tomaron en consideración el intervalo de los valores de altura observados a la edad base.

A su vez, Monroy (1996) utilizando el modelo de Schumacher para describir el crecimiento en altura, determinó una edad base de 40 años, misma que utilizó para generar seis curvas de índice de sitio, a una equidistancia de cuatro metros. La diferencia entre el estudio de Monroy (1996) y el presente, es que este autor no hace mención de cómo determinó la edad base, además de que

la equidistancia entre curvas fue un metro más alta que la que se determinó en el presente estudio. Con respecto al número de curvas, este autor generó una curva más respecto de las que se generaron en el proceso anamórfico y polimórfico del presente trabajo lo cual resulta problemático al tratar de asignarle una categoría cualitativa.

Sánchez y Del Castillo (2001) determinaron que el mejor modelo para describir el crecimiento en altura fue el siguiente: $A^{-1} = B_0 + B_1E^{-2}$. Los autores utilizaron una edad base de 50 años, con la que generaron tres curvas de índice de sitio a equidistancias variables entre curvas de 5.8 m por arriba de la curva promedio y una equidistancia de 5.54 m por debajo. Al comparar el estudio realizado por Sánchez y Del Castillo (2001) respecto al proceso polimórfico del presente estudio se encontró que el estudio realizado por estos autores es muy diferente al presente, debido a que no emplearon el mismo criterio para determinar la edad base, además la equidistancia entre curvas no fue proporcional.

Con respecto a los incrementos en altura, ICA e IMA, para cada índice de sitio en el proceso anamórfico de este estudio, los valores máximos del ICA fueron 0.96, 0.84, 0.73, 0.62 y 0.51 m año^{-1} para los IS de 25.46, 22.46, 19.46, 16.46 y 13.46 m, respectivamente, a la edad de 20 años (Figura 7). Posteriormente, el ICA presenta un descenso rápido por debajo de los valores de los incrementos iniciales (Figura 7). Mientras que el IMA presenta un incremento de 0.79, 0.70, 0.61, 0.51 y 0.42 m año^{-1} para los IS de 25.46, 22.46, 19.46, 16.46 y 13.46 m, respectivamente, el cual es de menor intensidad hasta los 32 años, siendo esta la

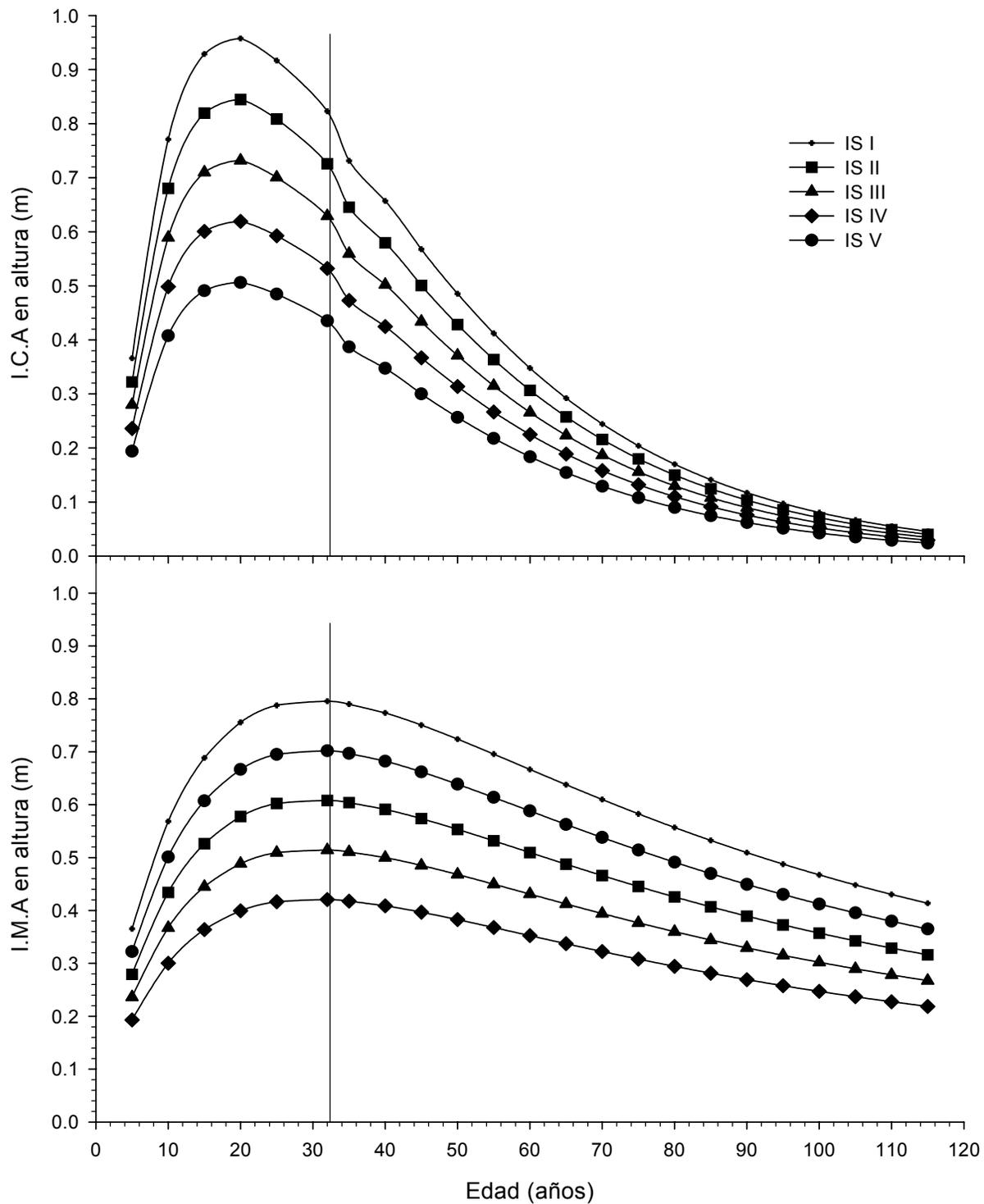


Figura 7. Curvas anamórficas de índice de sitio expresadas en función de los incrementos corriente (ICA) y medio anual (IMA) en altura y la edad base a 32 años de *Pinus herrerae* Martínez, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

edad a la cual presenta su punto de inflexión. Posteriormente, el IMA presenta un descenso menos pronunciado que el ICA, para las diferentes curvas de índice de sitio (Figura 7).

Con el método polimórfico los valores más altos del ICA para el IS=27.5 m (0.81 m año^{-1}) se obtienen a la edad de 25 años. Mientras que los valores del ICA para los IS=24.5, 21.5, 18.5 y 15.5 m (0.74 , 0.67 , 0.60 y 0.51 m año^{-1}) se encuentran a los 20 años. Luego, el ICA presenta un descenso rápido por debajo de los valores de los incrementos iniciales. Mientras que el IMA presenta un incremento de 0.69 , 0.62 , 0.55 , 0.49 y 0.42 m año^{-1} para los índices de sitio de 27.5, 24.5, 21.5, 18.5 y 15.5 m, respectivamente, a las edades de 40, 35, 30, 30 y 25 años, respectivamente. Posteriormente, el IMA presenta un descenso menos pronunciado que el del ICA, para las diferentes curvas de índice de sitio (Figura 8).

Finalmente, es importante mencionar las ventajas y desventajas de los procesos anamórfico y polimórficos utilizados en este estudio para la construcción de curvas de índice de sitio. Con relación al proceso anamórfico se tiene como ventaja que el modelo y el método de ajuste utilizados son de configuración más sencilla, y como desventaja tiene que no se incluye todo el rango de distribución de la especie en el área de estudio. Para el polimórfico se tiene como ventaja que si se incluye todo el rango de distribución natural de la especie en el área de estudio y, como desventajas tiene que el modelo es de configuración más compleja, además el principal problema es el cómo determinar los parámetros iniciales del modelo.

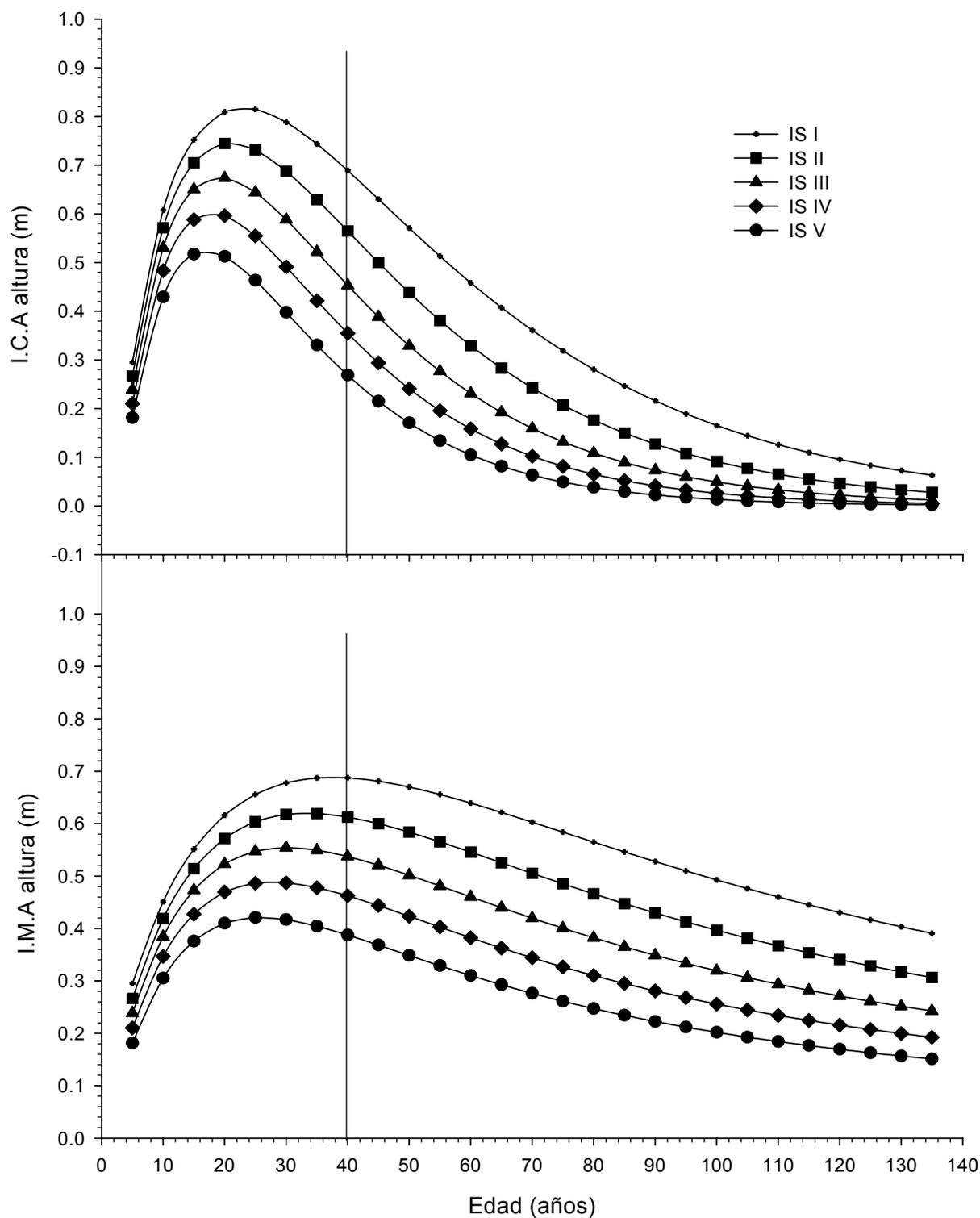


Figura 8. Curvas polimórficas de índice de sitio expresadas en función de los incrementos corriente (ICA) y medio anual (IMA) en altura y la edad base a 40 años de *Pinus herrerae* Martínez, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

CONCLUSIONES

- 1) Se diseñó una metodología para detectar árboles que presentan problemas de supresión en los primeros 25 años de crecimiento.
- 2) Usando el método anamórfico, el modelo de Chapman-Richards fue el que presentó la mejor bondad de ajuste, además, fue el más apropiado para describir el crecimiento en altura de *Pinus herrerae* cuando la altura está en función de la edad.
- 3) A partir de la aplicación de los límites de confianza de los valores individuales, la curva guía y la edad base se determinaron cinco curvas anamórficas de índice de sitio a una equidistancia de tres metros entre curvas.
- 4) La edad base elegida con el método anamórfico fue de 32 años, edad a la cual se estimó el índice de sitio para las curvas anamórficas.
- 5) Los modelos de Gompertz y Schumacher pueden probarse en trabajos similares al proceso anamórfico del presente estudio, ya que presentaron valores de los estadísticos cercanos a los del modelo seleccionado.
- 6) A partir de la aplicación del rango de dispersión de los valores de altura observados a la edad base de 40 años se determinaron cinco curvas polimórficas de índice de sitio a una equidistancia de tres metros entre curvas.

7) La edad base elegida con el método polimórfico fue de 40 años, edad a la cual se estimó el índice de sitio para las curvas polimórficas.

8) No se cuenta con una metodología estandarizada para la construcción de curvas de índice de sitio, lo cual dificulta la comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con los obtenidos por otros autores.

RECOMENDACIONES

- 1) Utilizar la metodología para detectar árboles suprimidos, dado que por medio de ésta se pueden descartar los árboles que presenten problemas de supresión en sus primeras etapas de desarrollo, eliminando así, una fuente de sesgo en la estimación de las curvas de índice de sitio.

- 2) Probar los modelos de Chapman-Richards, Gompertz y Schumacher para determinar los índices de sitio en otras especies y regiones, ya que son sencillos y prácticos.

- 3) Emplear los límites de confianza de los valores individuales y la curva guía respecto de la edad base, para determinar la equidistancia entre curvas de índice de sitio.

- 4) Utilizar los índices de sitio obtenidos para *Pinus herrerae* como punto de referencia en la elaboración de los planes de manejo y aprovechamiento para la región de Cd. Hidalgo, Mich.

- 5) Validar en campo los modelos que se utilizaron para construir las curvas de índice de sitio, con el fin de saber cual de estos es el mejor, dado que ambos presentaron buenos ajustes con las observaciones.

6) Estandarizar una metodología para la construcción de curvas de índice de sitio, de manera que permita realizar las comparaciones con mayor facilidad. A través de un estudio comparativo se puede saber cuál es la metodología más apropiada bajo ciertas condiciones y necesidades.

LITERATURA CITADA

- Aguilar R., M. 1991. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Ciencia Forestal*. 16(70):87-108.
- Aguilar R., M. 1997. Estudio del crecimiento de *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus lawsonii* Roetzl. en la región central de Michoacán. *Ciencia Forestal*. 22(81): 41-70.
- Aguilar R., M. y D. Aguilar S. 1991. Determinación de la "Calidad de estación" en los bosques de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. *Ciencia Forestal*. 16(69): 35-57.
- Aguirre B., C. 1984. Estimación del índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región de Iturbide, Nuevo León. Tesis profesional. UACH. Chapingo, México. 71 p.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos Vol. 2. Predicción del rendimiento. FAO. Montes. Estudio 22/2. roma. 118 p.
- Arteaga M., B., M. A. Musálem S. y A. Trinidad S. 1988. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla. *Agrociencia*. México. 72:133-141.

- Bailey , R. L. y J. L. Clutter. 1974. Base-age invariant polimorphic site curves. Forest Science. 20(2):155-159.
- Beck, D. E. 1971. Height-growth patterns and site index of white pine in the Southern Appalachians. Forest Science. 17(2): 253-261.
- Benavides S., J. de D. 1991. "Índices de sitio" para estimar la "calidad de sitio" en bosques de coníferas. Ciencia Forestal. 16(69): 3-33.
- Benavides S., J. de D. y H. Manzanilla B. 1993. Estimación de la "calidad de sitio" mediante "índices de sitio" de *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el ADF Tapalpa, Jalisco. Ciencia Forestal. 18(74) 121-138.
- Bojorges S., J. A. 1990. Índice de sitio para oyamel (*Abies religiosa* (H. B. K) Schl. et Cham.) en Zoquiapan, México. Tesis profesional. UACH. Chapingo, México. 57 p.
- Brickell, J. E. 1968. A method for constructing site index curves from measurements of tree age and height its application to inland Douglas-fir. USDA. Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper. Int-47. USA. 23 p.

Carmean, W. H. 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States.
Forest Science. 18(2):109-120.

CETENAL. 1977a. Carta Topográfica. E14A15. Maravatío. Esc. 1:50,000. México.

CETENAL. 1977b. Carta Topográfica. E14A24. Tzitzio. Esc. 1:50,000. México.

CETENAL. 1977c. Carta Topográfica. E14A25. Ciudad Hidalgo. Esc. 1:50,000.
México.

CETENAL. 1977d. Carta Edafológica. E14A15. Maravatío. Esc. 1:50,000. México.

CETENAL. 1977e. Carta Edafológica. E14A24. Tzitzio. Esc. 1:50,000. México.

CETENAL. 1977f. Carta Edafológica. E14A25. Ciudad Hidalgo. Esc. 1:50,000.
México.

Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar y G. H. Brister. 1983. Timber
Management: a quantitative approach. Wiley and Sons. New York. USA.
333 p.

CONAGUA. 1999. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal Michoacán.
Distrito de riego 045 "Tuxpan". Unidad "Hidalgo".

Curtis, R. O. 1964. A stem-analysis approach to site-index curves. *Forest Science*. 16:403-414.

De la Fuente E., A. 1985. Determinación de la calidad de estación para *Pinus rudis* Endl. en la región de “La Cumbre”, Oaxaca. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 68 p.

DETENAL. 1979a. Carta geológica. E14A24. Tzitzio. Esc. 1:50,000. SPP. México.

DETENAL. 1979b. Carta geológica. E14A15. Maravatío. Esc. 1:50,000. SPP. México.

DETENAL. 1979c. Carta geológica. E14A24. Cd. Hidalgo. Esc. 1:50,000. SPP. México.

Devan J., S. y H. E. Burkhart. 1982. Polimorphic site index equations for loblolly pine based on a segmented polynomial differential model. *Forest Science*. 28(3): 345-353.

Franco A., R. C. 2001. Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. y su asociación con variables del clima, fisiografía, físico-químicas del suelo y vegetación en Cd. Hidalgo, Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias

Forestales Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 101 p.

Gagnon, R. y Morin H. 2001. WinDendro™ 2001 b. Regent Instruments Inc. Chicoutimi, Quebec, Canada. 82 p.

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía. UNAM. México. 246 p.

García, E. 1986. Apuntes de climatología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 155 p.

García M., J. J., J. Mas P. y J. M. Aguilar R. 1996. Desarrollo de una plantación de *Pinus herrerae* en la región sur-occidental de Michoacán. INIFAP, Folleto Técnico Núm. 14: 27 p.

INEGI. 2000. Estadísticas del medio ambiente México, 1999. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1997-1998. INEGI-SEMARNAT. Tomo I. México. 540 p.

Klepac, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Ed. E.N.A. UACH. México. 365 p.

- Layseca T., M., S. Monreal R. y J. Fernández M. 1997. Plantaciones forestales comerciales. Cuadernos Agrarios, Nueva época. 6(14). 110 p.
- Madrigal H., S. y H. Ramírez M. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índice de sitio en Michoacán. Ciencia Forestal. 20(78): 35-57.
- Maldonado R., F. 1984. Índice de sitio y modelos de crecimiento para *Pinus oaxacana* Mirov, de la región "Los Coatlán", Oaxaca. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 181 p.
- Martínez, M. E., C. G. Ibarra., V. A. Hernández y F. Lorea-Hernández. 1987. Contribución al conocimiento de la flora y vegetación de la región de los Azufres, Michoacán. Revista Trace. 12: 22-37.
- Monroy R., C. R. 1996. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. et. Cham. en la región de Huayacocotla, Veracruz. Ciencia Forestal. 21(80): 57-77.
- Moreno C., J. 1996. Comparación de dos métodos de construcción de curvas de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lind. en la región Hidalgo-Zinapécuaro de Michoacán. Tesis profesional. UACH. Chapingo, México. 68 p.

Quiñones C., A. 1995. Evaluación de la calidad de sitio y del efecto de la densidad en bosques del Salto, Durango. Tesis de Maestría en Ciencias. UACH. Chapingo, México. 129 p.

Quiñones C., A., R. Alemán V. y R. Trujillo. 2002. Determinación de la calidad de sitio para cuatro especies de pino en el P. P. "Sierra del Nayar", municipio de Durango. Folleto técnico Núm. 8. INIFAP. Durango. 27 p.

Sánchez V., N. M. y R. F. del Castillo S. 2001. Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. Foresta Veracruzana. 3(2): 9-12.

SEMARNAP. 1999. Anuario estadístico de la producción forestal 1997. México. 139 p.

SEMARNAP-UACH. 1999. Atlas forestal de México. SEMARNAP. 101 p.

Sit, V. y M. Poulin-Costello. 1994. Catalogue of curves for fitting. Biometrics Information. Handbook No.4. Ministry of Forest Research Program. British Columbia. 110 p.

Styles, B. T. 1993. Genus *Pinus*: a mexican purview. *In*: Biological diversity of Mexico: origins and distribution. R. Bye, A. Lot, and J. Fa (Eds). Oxford University Press. New York, U.S.A. pp. 397-420.

Spurr, S. H. y B. V. Barnes. 1980. Ecología forestal. AGT editor. México. 690 p.

Ucodefo-2. (Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal N° 2). 1994.

Organización de la unidad Ciclo 1994-1995. Cd. Hidalgo, Michoacán. 21 p.

Zamudio S., F. J. y D. Ayerde L. 1997. Modelos de crecimiento. Revista Chapingo.

Serie Ciencias Forestales. 3(1):79-87.

Zepeda B., E. M. y P. Rivero B. 1984. Construcción de curvas anamórficas de

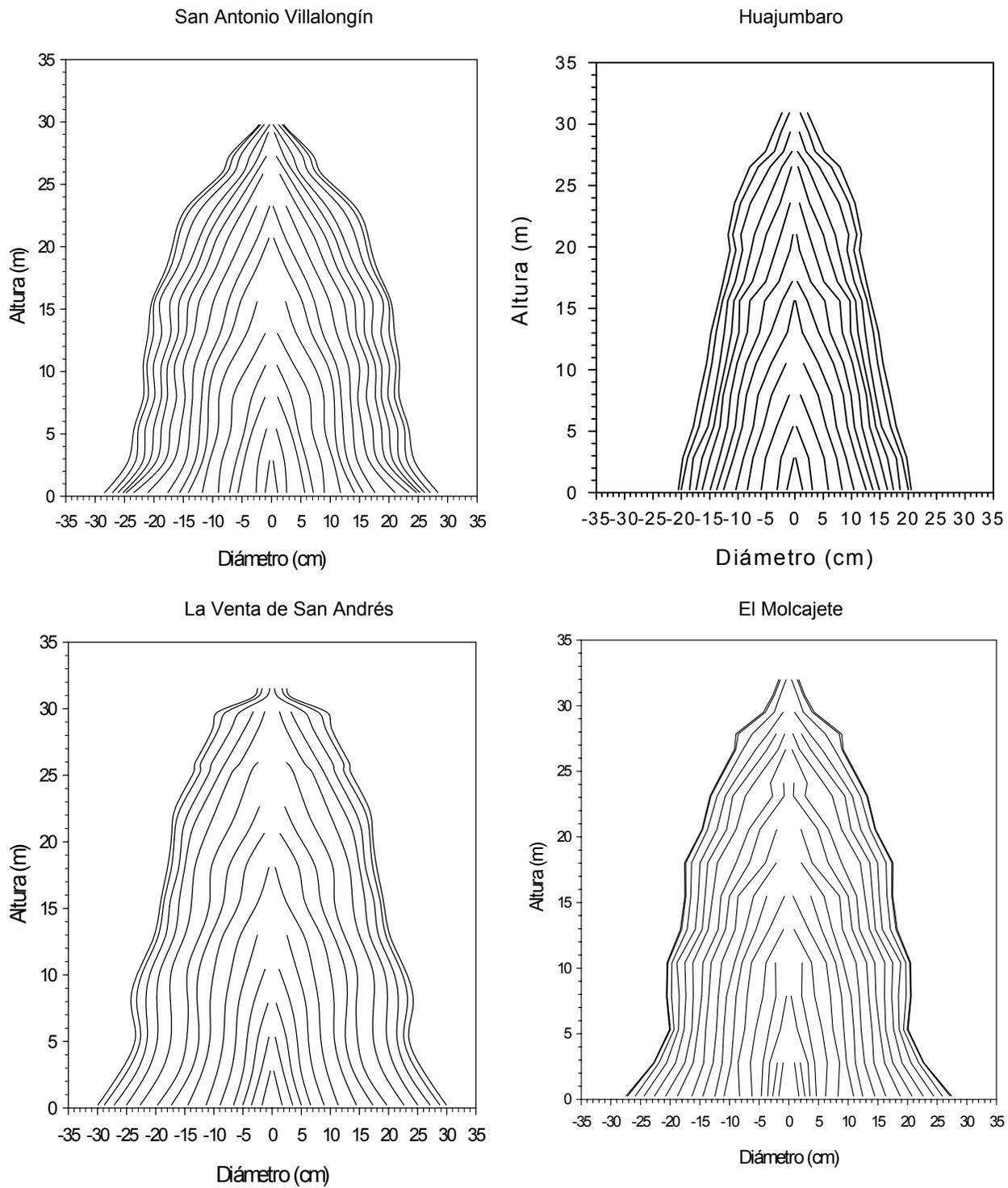
índice de sitio. Ejemplificación del método de la curva guía. Ciencia

Forestal. 9(51): 3-38.

APÉNDICES

Apéndice 1. Perfiles interiores de los árboles muestra que fueron no suprimidos y suprimidos en las primeras etapas de desarrollo.

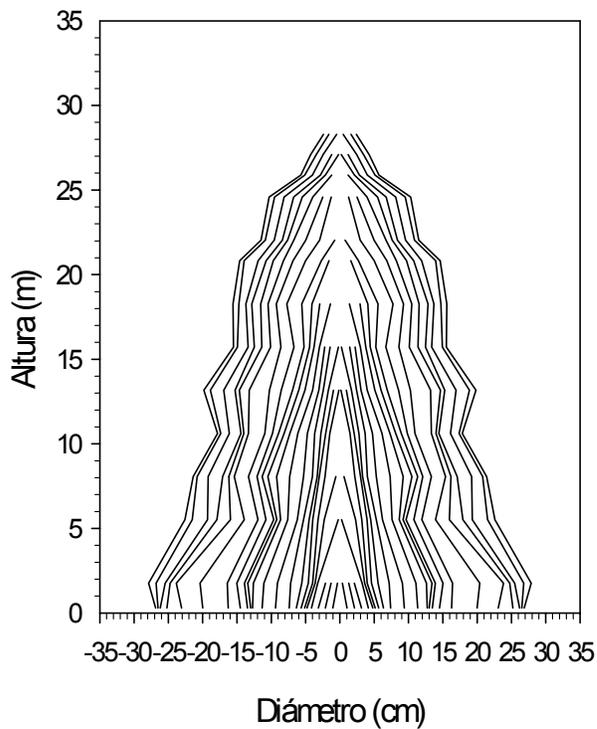
Árboles no suprimidos



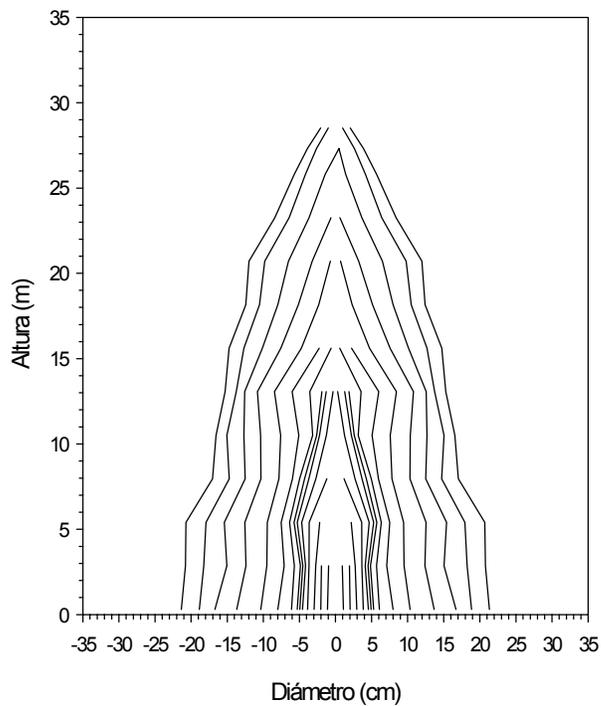
Continúa apéndice 1

Árboles suprimidos

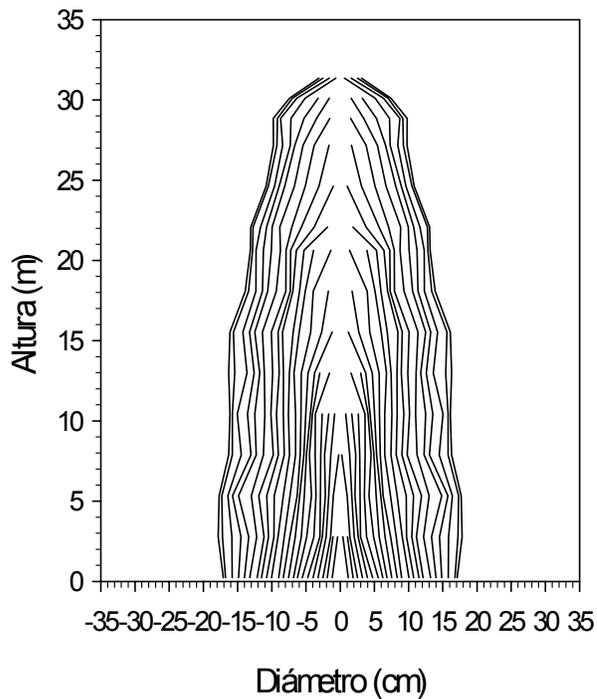
San Antonio Villalongín



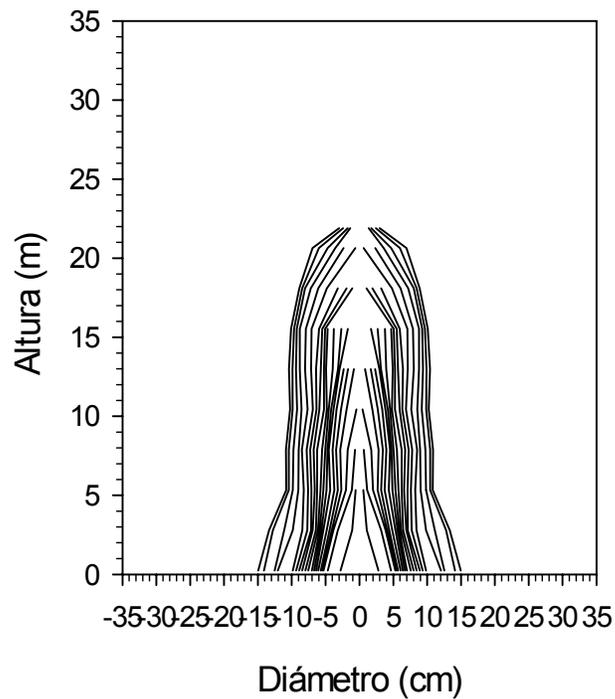
San Antonio Villalongín



San Antonio Villalongín



San Antonio Villalongín



Apéndice 2. Cálculo de la media y el error estándar del incremento corriente anual (ICA) en diámetro para las edades de 5, 10, 15, 20, 25 años, utilizando la rodaja a la primer altura de corte (0.30 m).

							Con Media y Error Estándar por localidad							
Loc		ICA5	ICA10	ICA15	ICA20	ICA25	Loc	Arb	ICA 5	ICA 10	ICA 15	ICA 20	ICA 25	Puntos
1	Media	0.6263	0.7769	0.7909	0.7041	0.6784	1	1	X	A	E	A	A	4
	Error Estándar	0.1203	0.1093	0.1524	0.0953	0.0889	1	2	E	E	A	A	A	5
							1	3	E	?	?	?	X	4
	Mas	0.7466	0.8862	0.9433	0.7994	0.7674	1	4	?	?	X	X	?	3
							1	5	A	A	A	A	A	5
	Menos	0.5059	0.6676	0.6384	0.6088	0.5895	1	6	A	?	X	?	E	4
							2	1	A	X	?	E	?	3
2	Media	0.7908	0.7663	0.5936	0.5031	0.4295	2	2	E	A	A	A	A	5
	Error Estándar	0.3102	0.2798	0.1685	0.1028	0.0606	2	3	A	E	E	?	?	5
							3	1	A	A	E	A	A	5
	Mas	1.1010	1.0462	0.7621	0.6059	0.4900	3	2	A	A	A	A	E	5
							3	3	E	E	E	E	E	5
	Menos	0.4805	0.4865	0.4250	0.4003	0.3689	3	4	X	X	X	X	X	0
							4	1	A	A	A	A	A	5
3	Media	0.2766	0.4905	0.5730	0.5439	0.4988	4	2	?	X	X	X	X	1
	Error Estándar	0.0646	0.1759	0.2016	0.1769	0.1652	4	3	E	X	E	E	A	4
							4	4	A	A	E	A	E	5
	Mas	0.3412	0.6664	0.7746	0.7208	0.6640	4	5	?	E	E	E	A	5
							4	6	X	?	E	X	E	3
	Menos	0.2120	0.3146	0.3714	0.3670	0.3337	5	1	E	E	E	E	E	5
							5	2	E	E	E	E	E	5
4	Media	0.8093	1.0206	1.0577	1.0364	1.0627	6	1	?	E	A	A	A	5
	Error Estándar	0.1250	0.2190	0.1735	0.2111	0.0986	6	2	?	X	A	E	A	4
							6	3	X	X	X	X	X	0
	Mas	0.9343	1.2396	1.2311	1.2475	1.1613	6	4	X	X	E	A	E	3
							6	5	A	A	A	E	A	5
	Menos	0.6843	0.8016	0.8842	0.8253	0.9642	6	6	A	A	E	A	A	5
							6	7	A	A	E	X	?	4
5	Media	0.4165	0.8425	0.6939	0.4422	0.3022	6	8	A	A	X	X	X	2
	Error Estándar	0.1033	0.2210	0.1452	0.0023	0.0194	6	9	?	A	A	E	A	5
							6	10	A	A	A	A	E	5
	Mas	0.5198	1.0635	0.8391	0.4445	0.3216	6	11	A	A	A	A	A	5
							6	12	E	E	?	X	X	3
	Menos	0.3132	0.6215	0.5487	0.4398	0.2828	6	13	E	X	E	E	E	4
							6	14	E	A	?	A	A	5
6	Media	0.5714	0.8756	0.7004	0.5742	0.6165	6	15	A	A	A	E	?	5
	Error Estándar	0.0460	0.0937	0.0668	0.0549	0.0724	6	16	X	E	A	A	A	4
							6	17	X	X	X	E	?	2
	Mas	0.6173	0.9693	0.7672	0.6292	0.6889	6	18	X	X	X	X	X	0
							6	19	?	X	X	X	X	1
	Menos	0.5254	0.7819	0.6336	0.5193	0.5440	6	20	A	?	X	X	X	2

Donde: Loc = localidad; Arb = árbol; X = por abajo del rango; A = por arriba del rango; E = entre el rango; ? = un poco por abajo del rango.

Apéndice 3. Cálculo de la media y el error estándar del incremento medio anual (IMA) en diámetro para las edades de 5, 10, 15, 20, 25 años, utilizando la rodaja a la primer altura de corte (0.30 m).

							Con Media y Error Estándar por localidad							
Loc		IMA5	IMA10	IMA15	IMA20	IMA25	Loc	Arb	IMA 5	IMA 10	IMA 15	IMA 20	IMA 25	Puntos
1	Media	0.6263	0.7016	0.7313	0.7245	0.7153	1	1	X	?	E	E	E	4
	Error Estándar	0.1203	0.0963	0.1036	0.0971	0.0918	1	2	E	E	E	A	A	5
							1	3	E	?	?	?	X	4
	Mas	0.7466	0.7979	0.8350	0.8216	0.8071	1	4	?	X	X	X	X	1
							1	5	A	A	A	A	A	5
	Menos	0.5059	0.6053	0.6277	0.6274	0.6235	1	6	A	E	E	E	E	5
							2	1	X	X	X	X	X	0
2	Media	0.7908	0.7663	0.5936	0.5031	0.4295	2	2	E	E	A	A	A	5
	Error Estándar	0.3102	0.2798	0.1685	0.1028	0.0606	2	3	A	A	E	E	E	5
							3	1	A	A	A	A	A	5
	Mas	1.1010	1.0462	0.7621	0.6059	0.4900	3	2	A	A	A	A	A	5
							3	3	E	E	E	E	E	5
	Menos	0.4805	0.4865	0.4250	0.4003	0.3689	3	4	X	X	X	X	X	0
							4	1	A	A	A	A	A	5
3	Media	0.2766	0.4905	0.5730	0.5439	0.4988	4	2	?	X	X	X	X	1
	Error Estándar	0.0646	0.1759	0.2016	0.1769	0.1652	4	3	E	?	?	E	E	5
							4	4	A	A	A	A	A	5
	Mas	0.3412	0.6664	0.7746	0.7208	0.6640	4	5	?	E	E	E	E	5
							4	6	X	?	?	X	?	3
	Menos	0.2120	0.3146	0.3714	0.3670	0.3337	5	1	E	E	E	E	E	5
							5	2	E	E	E	E	E	5
4	Media	0.8093	1.0206	1.0577	1.0364	1.0627	6	1	X	?	E	A	A	4
	Error Estándar	0.1250	0.2190	0.1735	0.2111	0.0986	6	2	X	X	E	E	A	3
							6	3	X	X	X	X	X	0
	Mas	0.9343	1.2396	1.2311	1.2475	1.1613	6	4	X	X	X	?	?	2
							6	5	A	A	A	A	A	5
	Menos	0.6843	0.8016	0.8842	0.8253	0.9642	6	6	A	A	A	A	A	5
							6	7	A	A	A	A	A	5
5	Media	0.4165	0.8425	0.6939	0.4422	0.3022	6	8	A	A	E	E	?	5
	Error Estándar	0.1033	0.2210	0.1452	0.0023	0.0194	6	9	?	A	A	A	A	5
							6	10	A	A	A	A	A	5
	Mas	0.5198	1.0635	0.8391	0.4445	0.3216	6	11	A	A	A	A	A	5
							6	12	E	E	E	?	X	4
	Menos	0.3132	0.6215	0.5487	0.4398	0.2828	6	13	E	E	E	?	X	4
							6	14	E	?	?	?	?	5
6	Media	0.5714	0.8756	0.7004	0.5742	0.6165	6	15	A	A	A	A	A	5
	Error Estándar	0.0460	0.0937	0.0668	0.0549	0.0724	6	16	X	X	?	E	E	3
							6	17	X	X	X	X	X	0
	Mas	0.6173	0.9693	0.7672	0.6292	0.6889	6	18	?	X	X	X	X	1
							6	19	?	X	X	X	X	1
	Menos	0.5254	0.7819	0.6336	0.5193	0.5440	6	20	A	A	E	?	X	4

Donde: Loc = localidad; Arb = árbol; X = por abajo del rango; A = por arriba del rango; E = entre el rango; ? = un poco por abajo del rango.

Apéndice 4. Programa para la selección del modelo y describir el crecimiento en altura con el método anamórfico.

```
options ps=60 ls=80 pageno=1;
proc format;
value local 1='huajumbaro' 2='lajoya' 3='laventa' 4='molcajete' 5='los coss'
           6='sanantonio';
data uarector;
infile'C:\Mis documentos\OSCAR MARES Y JOSE CAIN\Programas SAS\edadaltura2.dat';
input local arbol alt edad;
format local local.
if alt=15.71 and edad=50 then delete;
if alt=13.15 and edad=43 then delete;
if alt=15.61 and edad=48 then delete;
if alt=13.05 and edad=42 then delete;
if alt=10.59 and edad=37 then delete;
if alt=18.17 and edad=54 then delete;
if alt=18.27 and edad=54 then delete;
if alt=8.03 and edad=32 then delete;
if alt=20.73 and edad=62 then delete;
if alt=18.20 and edad=50 then delete;
if alt=43.10 and edad=121 then delete;
if alt=5.29 and edad=26 then delete;
if alt=7.93 and edad=30 then delete;
if alt=10.49 and edad=34 then delete;
if alt=5.47 and edad=25 then delete;
if alt=24.55 and edad=85 then delete;
if alt=22.14 and edad=66 then delete;
if alt=15.65 and edad=43 then delete;
if alt=7.83 and edad=28 then delete;
if alt=20.83 and edad=59 then delete;
if alt=23.55 and edad=73 then delete;
if alt=2.75 and edad=20 then delete;
if alt=15.64 and edad=43 then delete;
if alt=13.03 and edad=36 then delete;
if alt=13.08 and edad=36 then delete;
if alt=15.58 and edad=41 then delete;
if alt=36.85 and edad=53 then delete;
if alt=20.76 and edad=55 then delete;
if alt=22.06 and edad=60 then delete;
if alt=22.80 and edad=63 then delete;
if alt=25.27 and edad=79 then delete;
if alt=24.26 and edad=71 then delete;
if alt=10.37 and edad=30 then delete;
if alt=24.02 and edad=68 then delete;
if alt=26.87 and edad=94 then delete;
if alt=25.13 and edad=95 then delete;
if alt=10.48 and edad=30 then delete;
if alt=23.39 and edad=64 then delete;
if alt=25.60 and edad=77 then delete;
if alt=18.13 and edad=45 then delete;
if alt=5.37 and edad=22 then delete;
if alt=26.75 and edad=87 then delete;
if alt=25.13 and edad=75 then delete;
if alt=22.77 and edad=59 then delete;
if alt=10.52 and edad=29 then delete;
```

Continua apéndice 4

```

if alt=7.93 and edad=25 then delete;
if alt=35.55 and edad=52 then delete;
*proc plot;
* plot alt*edad='*' / hpos=60 vpos=40;
*run;
*proc means n min max mean stderr cv;
* var alt edad;
*run;
*proc sort;
* by local;
*proc means n min max mean stderr cv;
* by local;
* var alt edad;
*run;
*proc univariate normal plot;
* var alt edad;
*run;
PROC NLIN data=uarector;
  title3 'Chapman-Richards Model';
  PARAMETER A=8 B=0.2 TO 2.0 BY 0.1 C=0.1 to 5 by 0.1;
  X=EDAD;
  Y=ALT;
  EBX= EXP(-B*X);
  EBX1=1-EBX;
  EBXC=(EBX1)**C;
  MODEL Y=A*EBXC;
  DER.A=EBXC;
  DER.B=A*X*C*EBX*EBX1**(C-1);
  DER.C=A*EBXC*LOG(EBX1);
OUTPUT OUT=DATA1 P=PALT STDP=ESALT I95=I95 u95=u95 I95m=I95m u95m=u95m
      R=RALT student=rstu;
proc univariate normal plot DATA=DATA1;
var RALT;
run;
PROC PLOT DATA=DATA1;
PLOT RALT*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
PLOT rstu*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
PROC PLOT DATA=DATA1;
PLOT ALT*EDAD='O' PALT*EDAD='P' I95*EDAD='I' u95*EDAD='u'
      I95m*EDAD='m' u95m*EDAD='m' / HPOS=60 VPOS=40 OVERLAY;
run;
PROC SORT DATA=DATA1;
BY rstu ;
PROC PRINT DATA=DATA1;
VAR rstu ALT EDAD PALT ESALT RALT;
RUN;

```

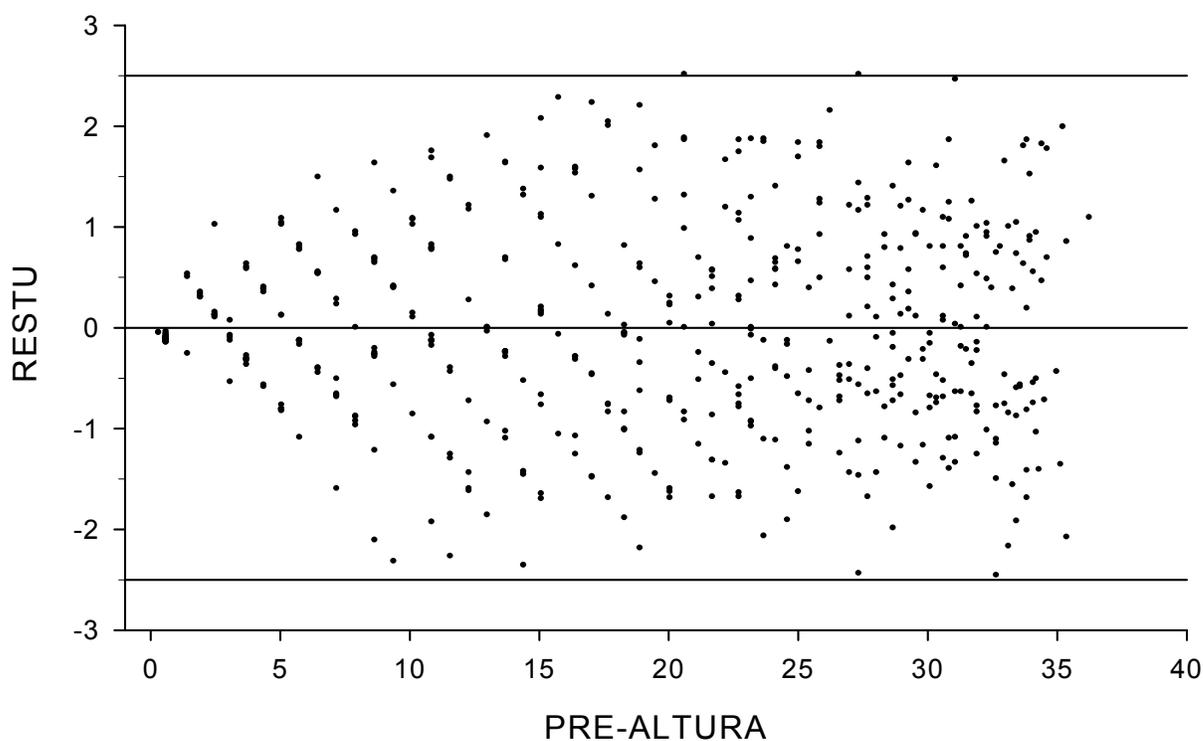
Apéndice 5. Análisis de varianza del modelo no lineal utilizado para la variable altura con el método anamórfico.

Variable	Modelo	F.V.	G.L.	SC	CM	R ²
Altura	Chapman-Richards	Regresión	3	247385.80217	82461.93406	0.9845
		Error	520	3894.35963	7.4891	
		Total	523	251280.16180		

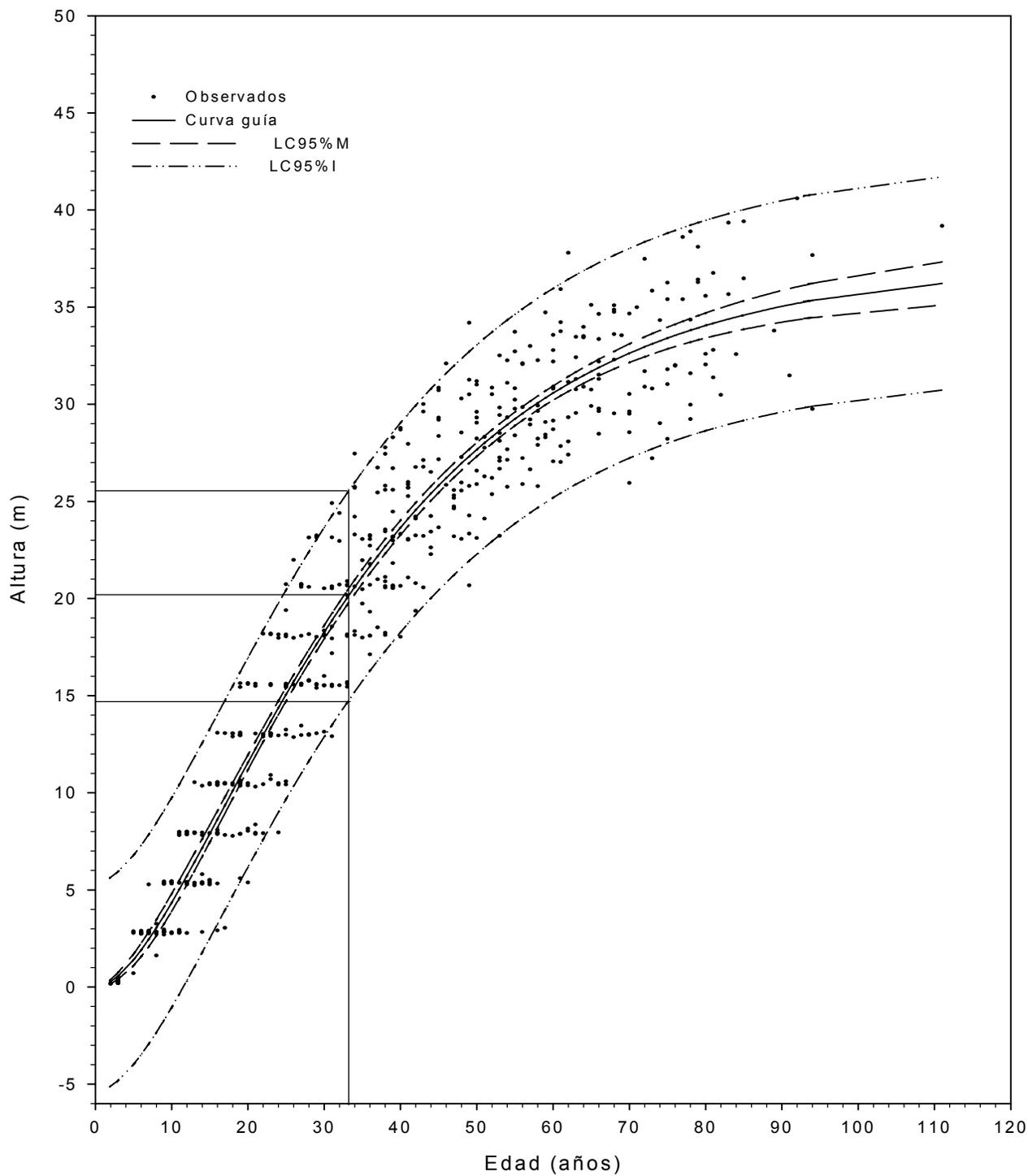
Donde:

F.V. = fuente de variación; GL = grados de libertad; SC = Suma de cuadrados; CM = Cuadrados medios; R² = coeficiente de determinación.

Apéndice 6. Tendencia de los residuales estudentizados para la variable altura, modelo de Chapman-Richards (proceso anamórfico).



Apéndice 7. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura, ajuste del modelo de Chapman-Richards, límites de confianza al 95% de la media (M) y de los valores individuales (I) para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.



Apéndice 8. Programa para el ajuste del modelo de Chapman-Richards y describir el crecimiento en altura con el método polimórfico.

```

options ps=60 ls=80 pageno=1;
proc format;
value local 1='huajumbaro' 2='lajoya' 3='laventa' 4='molcajete' 5='los coss'
        6='sanantonio';
data uarector;
infile'C:\Mis documentos\Oscar Mares\programas SAS\edadaltura.dat';
input local arbol arbol_no alt edad;
format local local.;
*if arbol_no=15; proc sort; by arbol_no; *proc means n min max mean stderr; * by arbol_no; * var
alt; edad; *run; *proc sort; * by local;
*proc means n min max mean stderr cv;
* by local;
* var alt edad;
*run;
*proc univariate normal plot;
* var alt edad;
*run;
PROC NLIN data=uarector;
  by arbol_no;
  title3 'Chapman-Richards Model';
  PARAMETER A=8.0 B=0.1 to 2.5 by 0.1 C=1.0;
  X=EDAD;
  Y=ALT;
  EBX= EXP(-B*X);
  EBX1=1-EBX;
  EBXC=(EBX1)**C;
  MODEL Y=A*EBXC;
  DER.A=EBXC;
  DER.B=A*X*C*EBX*EBX1**(C-1);
  DER.C=A*EBXC*LOG(EBX1);
OUTPUT OUT=DATA1 P=PALT STDP=ESALT I95=I95 u95=u95 I95m=I95m u95m=u95m
        R=RALT student=rstu;
PROC PLOT DATA=DATA1;
  by arbol_no;
  PLOT ALT*EDAD='O' PALT*EDAD='P' / HPOS=60 VPOS=40 OVERLAY;
run;
proc univariate normal plot DATA=DATA1;
  var RALT;
run;
PROC PLOT DATA=DATA1;
  PLOT RALT*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
  PLOT rstu*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
PROC PLOT DATA=DATA1;
  PLOT ALT*EDAD='O' PALT*EDAD='P' I95*EDAD='I' u95*EDAD='u'
        I95m*EDAD='m' u95m*EDAD='m' / HPOS=60 VPOS=40 OVERLAY;
run;
PROC SORT DATA=DATA1;
  BY rstu ;
PROC PRINT DATA=DATA1;
  VAR rstu ALT EDAD PALT ESALT RALT;
RUN;

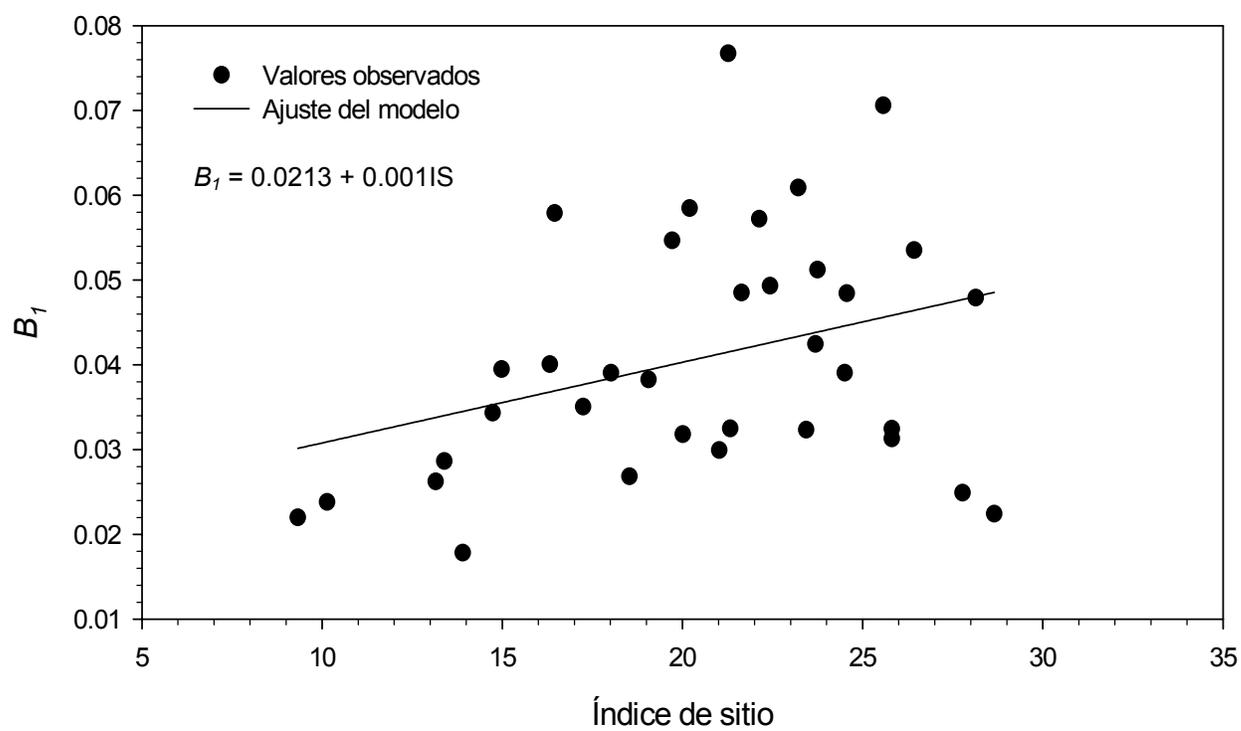
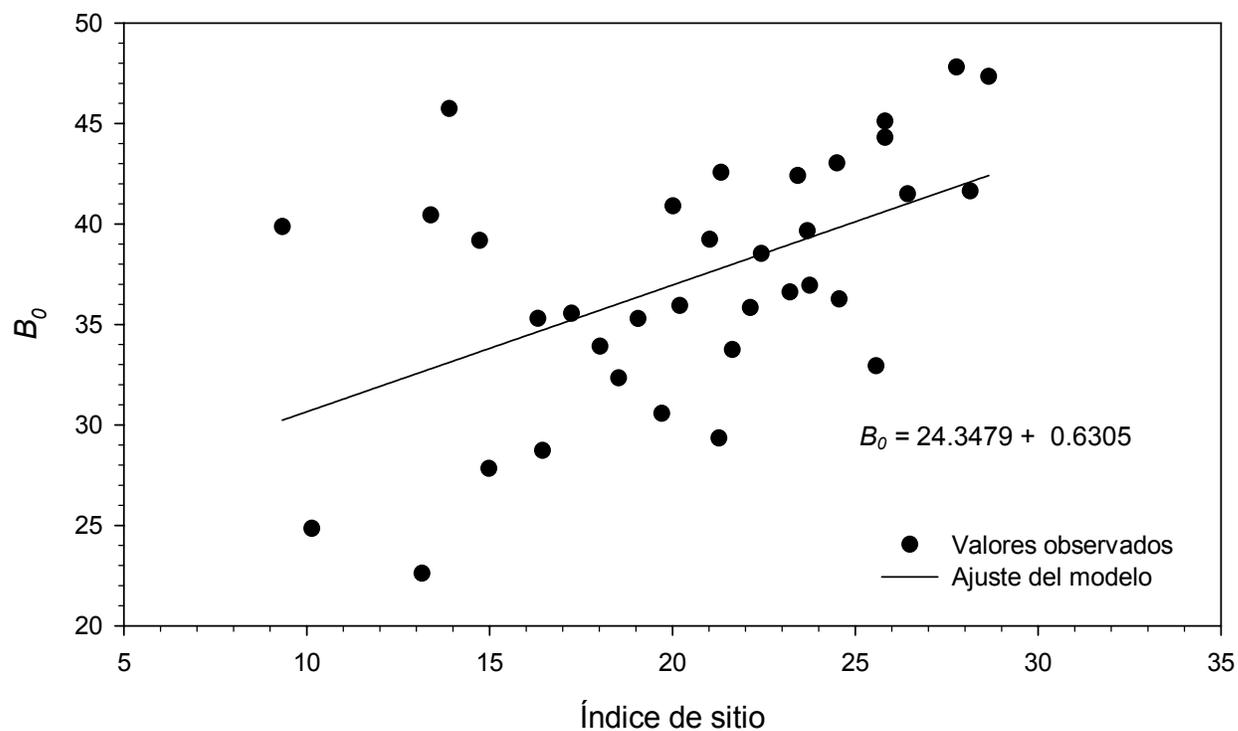
```

Apéndice 9. Resultados del ajuste por árbol del modelo Chapman-Richards, edad base por árbol e índice de sitio por árbol.

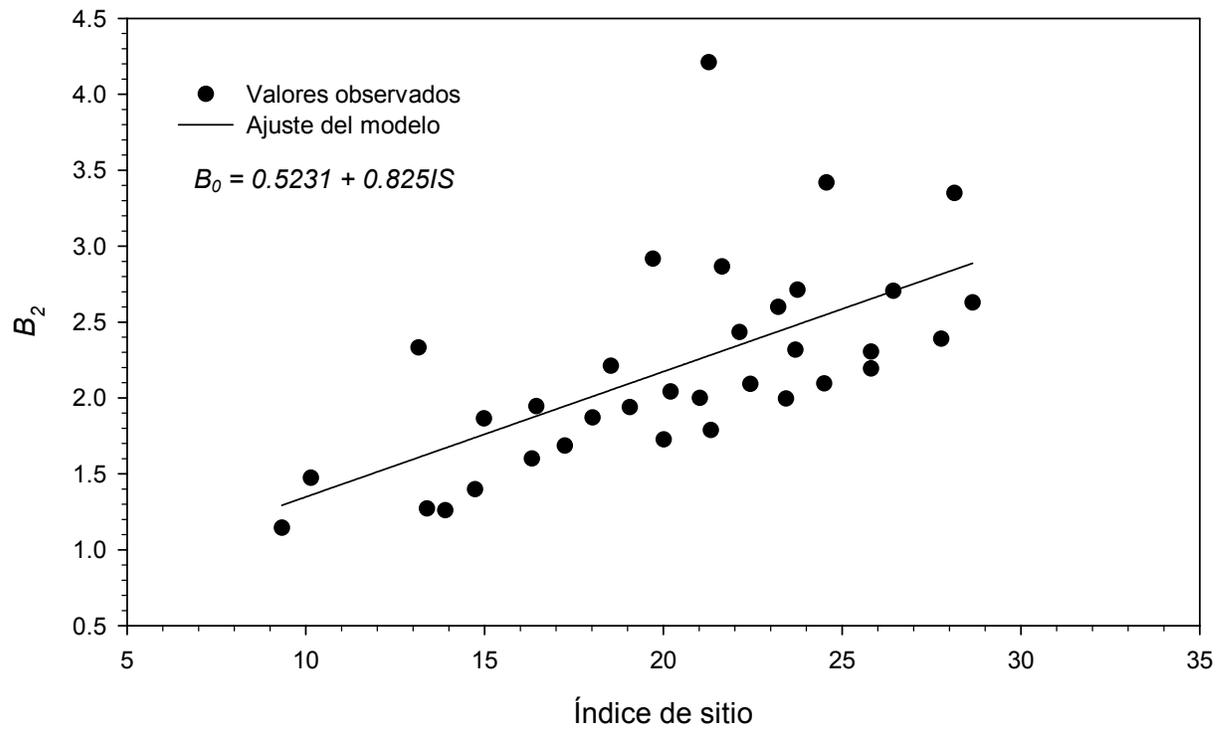
# Arbol	B_0	B_1	B_2	EB/Ind	IS
1	44.3065487	0.03131231	2.30515957	50	25.81
2	40.8954924	0.03181048	1.72636035	34	20.01
3	47.3383745	0.02242529	2.62862414	78	28.65
4	32.3381484	0.02683677	2.21181006	56	18.53
5	35.2902013	0.03826904	1.93906536	34	19.06
6	34.6823022	0.02295287	1.63827727	43	34.68
7	47.7971119	0.02490315	2.39070134	64	27.77
8	30.5686558	0.05467397	2.91667625	36	19.71
9	27.8324766	0.03947049	1.86432974	32	14.98
10	39.6614383	0.04244743	2.31826453	38	23.69
11	33.7431999	0.04851861	2.8647342	40	21.64
12	36.2634331	0.04843637	3.41832838	46	24.56
13	39.173784	0.03435454	1.39878174	20	14.73
14	45.7327119	0.01782538	1.26029477	28	13.90
15	43.0256725	0.03906339	2.09553296	37	24.50
16	32.9359169	0.07059916	8.51302419	50	25.57
17	42.5684107	0.03250241	1.78814877	35	21.33
18	42.4050951	0.03233143	1.9956311	42	23.43
19	24.8490228	0.02381146	1.47322452	33	10.14
20	22.6091355	0.02623149	2.33283986	60	13.15
21	29.346685	0.0767465	4.2110871	34	21.27
22	35.5489374	0.03506249	1.68467883	30	17.24
23	39.2253755	0.02993328	2.00006169	44	21.02
24	38.523674	0.04932032	2.09284731	30	22.43
25	28.7266951	0.05788637	1.9446419	24	16.45
26	41.6412582	0.04790605	3.34957946	46	28.14
27	40.4444963	0.02863568	1.27274659	19	13.39
28	39.8717318	0.02198692	1.14413687	15	9.33
29	35.9361723	0.058463	2.04155179	24	20.20
30	41.4985517	0.05352654	2.70514059	35	26.43
31	33.904279	0.0390613	1.87183333	32	18.02
32	35.2972983	0.04006471	1.60117497	24	16.32
33	35.837678	0.0572012	2.43352383	30	22.13
34	36.6120472	0.06091156	2.59944347	30	23.21
35	36.9452389	0.05121572	2.71197169	37	23.75
36	45.1113564	0.0324455	2.19293977	46	25.81

Donde: B = parámetros; EB/Ind = edad base por árbol; IS = índice de sitio.

Apéndice 10. Valores observados vs predichos al estimar B_0 , B_1 y B_2 en función del índice de sitio (ajuste por árbol).



Continuación apéndice 10



Apéndice 11. Programa para la selección del modelo y describir el crecimiento en altura con el método polimórfico.

```

options ps=60 ls=80 pageno=1;
proc format;
value local 1='huajumbaro' 2='lajoya' 3='laventa' 4='molcajete' 5='los coss'
        6='sanantonio';
data uarector;
infile'C:\Mis documentos\Oscar Mares\programas SAS\ConCoss2.dat';
input local arbol edad alt is;
format local local.;
*if arbol_no=15;
*proc sort;
*by local and arbol;
*proc means n min max mean stderr;
*by arbol_no;
*var alt edad;
*run;
if alt=5.28 and edad=34 then delete; if alt=10.36 and edad=51 then delete; if alt=12.90 and
edad=63 then delete; if alt=7.82 and edad=35 then delete; if alt=13.05 and edad=42 then delete; if
alt=15.61 and edad=48 then delete; if alt=7.93 and edad=30 then delete; if alt=15.84 and edad=69
then delete; if alt=10.49 and edad=34 then delete; if alt=18.17 and edad=54 then delete; if alt=17.04
and edad=77 then delete; if alt=15.71 and edad=50 then delete; if alt=36.48 and edad=85 then
delete; if alt=32.05 and edad=80 then delete; if alt=37.68 and edad=94 then delete; if alt=39.18 and
edad=111 then delete; if alt=20.73 and edad=62 then delete; if alt=5.29 and edad=26 then delete; if
alt=13.15 and edad=43 then delete; if alt=18.27 and edad=54 then delete; if alt=18.24 and edad=90
then delete; if alt=5.37 and edad=22 then delete; if alt=10.38 and edad=34 then delete; if alt=36.85
and edad=53 then delete; if alt=35.58 and edad=80 then delete; if alt=10.59 and edad=37 then
delete; if alt=20.83 and edad=59 then delete; if alt=22.14 and edad=66 then delete; if alt=12.92 and
edad=42 then delete; if alt=8.03 and edad=32 then delete; if alt=19.32 and edad=105 then delete; if
alt=7.83 and edad=28 then delete; if alt=19.79 and edad=112 then delete; if alt=2.75 and edad=20
then delete; if alt=23.55 and edad=73 then delete; if alt=24.55 and edad=85 then delete; if alt=15.46
and edad=52 then delete; if alt=23.39 and edad=64 then delete; if alt=35.55 and edad=52 then
delete; if alt=20.29 and edad=125 then delete; if alt=34.20 and edad=49 then delete; if alt=23.25
and edad=29 then delete;
*proc plot;
* plot alt*edad='*' / hpos=60 vpos=40;
*run;
*proc sort;
* by arbol;
*proc means n min max mean stderr;
* by arbol;
* var alt edad;
*run;
*proc sort;
* by local;
*proc means n min max mean stderr cv;
* by local;
* var alt edad;
*run;
*proc univariate normal plot;
* var alt edad;
*run;
PROC NLIN data=uarector method=marquardt;
title3 'Chapman-Richards Model';
PARAMETER A=24.3479 B=0.6305 C=0.0213 D=0.001 E=0.5231 F=0.0825;

```

```

X1=IS;
X2=EDAD;
Y=ALT;
b1=(-1*(C+(D*X1)))*X2;
exb1=exp(b1);
oneexp=1-exb1;
b2=E+(F*X1);
expb2=oneexp**b2;
b0=A+(B*X1);
b0expb2=b0*expb2;
MODEL Y=b0expb2;
OUTPUT OUT=DATA1 P=PALT STDP=ESALT I95=I95 u95=u95 I95m=I95m u95m=u95m
      R=RALT student=rstu;
proc univariate normal plot DATA=DATA1;
var RALT;
run;
PROC PLOT DATA=DATA1;
PLOT RALT*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
PLOT rstu*palt='*' / VREF=-2.5 0 +2.5 HPOS=60 VPOS=40;
PROC PLOT DATA=DATA1;
PLOT ALT*EDAD='O' PALT*EDAD='P' I95*EDAD='I' u95*EDAD='u'
      I95m*EDAD='m' u95m*EDAD='m' / HPOS=60 VPOS=40 OVERLAY;
run;
PROC SORT DATA=DATA1;
BY rstu local ;
PROC PRINT DATA=DATA1;
VAR rstu local ALT EDAD PALT ;
RUN;

```

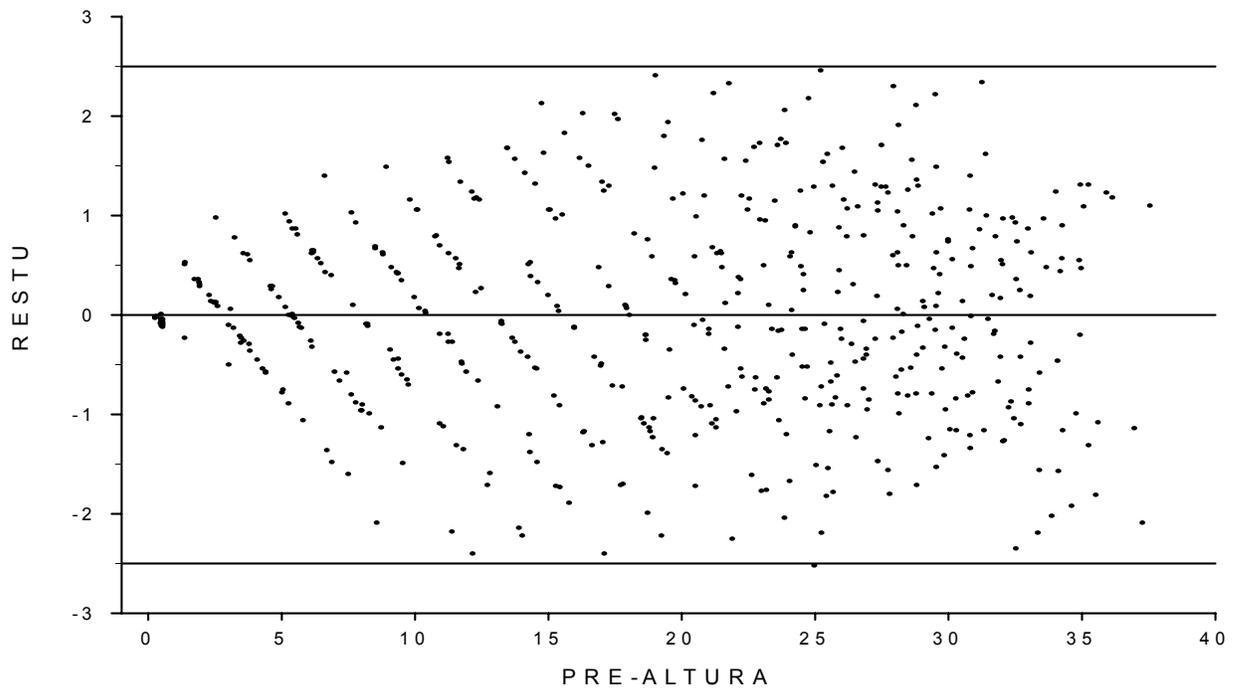
Apéndice 12. Análisis de varianza del modelo no lineal utilizado para la variable altura con el método polimórfico.

Variable	Modelo	F.V.	G.L.	SC	CM	R ²
Altura	Chapman-Richards	Regresión	6	251655.93455	41942.65576	0.98315
		Error	545	4314.11875	7.91581	
		Total	551	255970.05330		

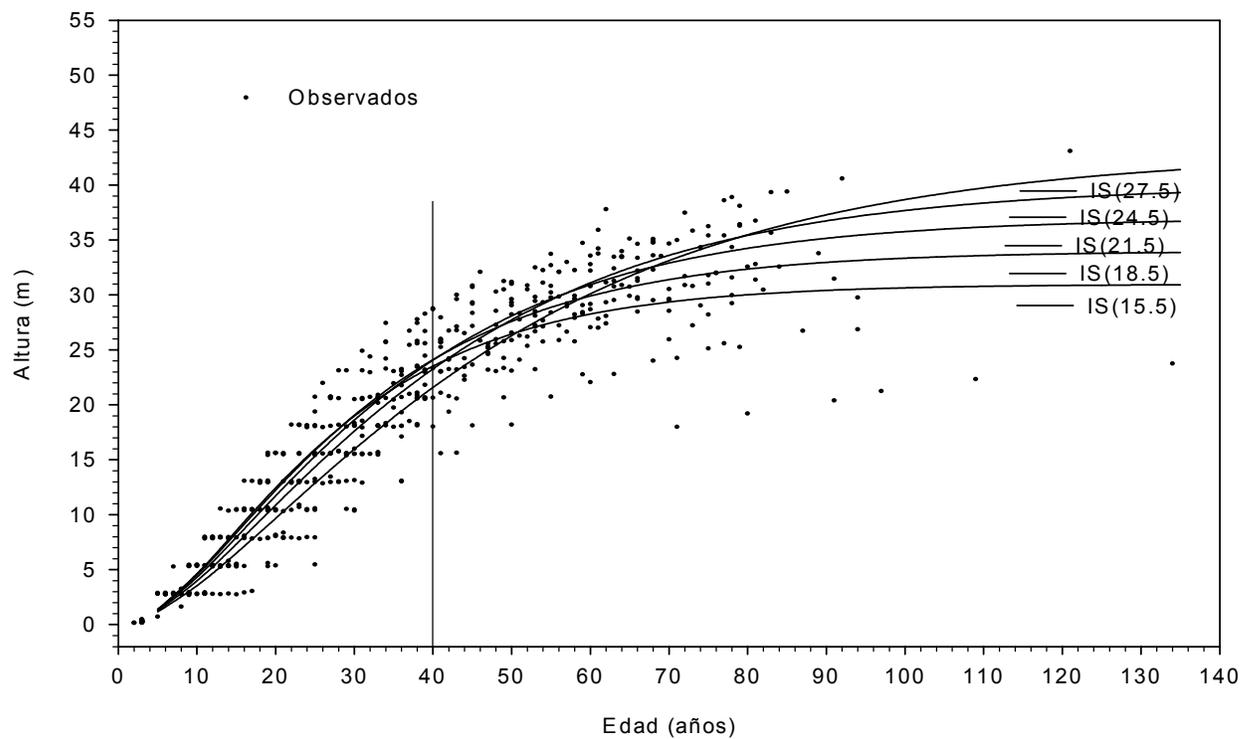
Donde:

F.V. = fuente de variación; GL = grados de libertad; SC = Suma de cuadrados; CM = Cuadrados medios; R² = coeficiente de determinación.

Apéndice 13. Tendencia de los residuales estudentizados para la variable altura, modelo de Chapman-Richards (proceso polimórfico).



Apéndice 14. Curvas polimórficas de índice de sitio (no corregidas) para *Pinus herrerae* Martínez a una edad base promedio de 40 años, en la región de Cd. Hidalgo, Mich.



Continuación apéndice 14. Altura estimada (sin corregir) por edad e índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Edad	Índice de sitio en (m)				
(años)	16	19	22	25	28
5	1.38	1.37	1.34	1.27	1.16
10	4.63	4.52	4.31	3.98	3.54
15	8.56	8.35	7.95	7.33	6.50
20	12.45	12.24	11.72	10.87	9.67
25	15.96	15.86	15.33	14.34	12.87
32	18.98	19.06	18.62	17.61	15.96
35	21.49	21.81	21.54	20.60	18.88
40	23.53	24.12	24.08	23.28	21.59
45	25.16	26.03	26.25	25.66	24.06
50	26.45	27.60	28.10	27.74	26.30
55	27.47	28.88	29.64	29.55	28.31
60	28.27	29.91	30.94	31.11	30.11
65	28.88	30.74	32.02	32.46	31.71
70	29.36	31.40	32.91	33.61	33.13
75	29.74	31.94	33.64	34.59	34.38
80	30.02	32.36	34.25	35.43	35.48
85	30.24	32.70	34.75	36.14	36.45
90	30.42	32.97	35.16	36.75	37.30
95	30.55	33.18	35.50	37.26	38.04
100	30.65	33.35	35.77	37.69	38.69
105	30.73	33.48	36.00	38.06	39.25
110	30.79	33.59	36.19	38.37	39.75
115	30.83	33.68	36.34	38.63	40.18
120	30.87	33.74	36.46	38.85	40.55
125	30.89	33.80	36.56	39.03	40.88
130	30.92	33.84	36.64	39.19	41.16
135	30.93	33.87	36.71	39.32	41.41

Apéndice 15. Índices de sitio, valores de índice de sitio predichos con el modelo de Chapman-Richards y factores de corrección calculados para cada curva.

Índice de sitio (m)	Valor predicho Con el modelo (m)	Factor de Corrección
15.5	23.53	0.6587335532
18.5	24.12	0.766998342
21.5	24.08	0.892857143
24.5	23.28	1.052405498
27.5	21.59	1.273737842

Apéndice 16. Diagrama de dispersión de la relación edad-altura y rango de los valores de altura observados a la edad base.

