



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Dendrocronología y estructura de *Pinus hartwegii*
en la cuenca del río Magdalena México D.F.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

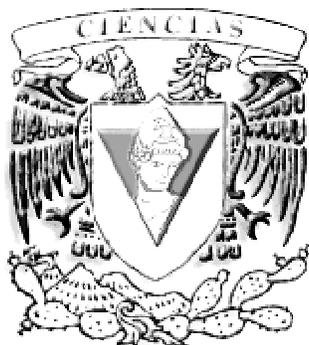
B I O L O G O

P R E S E N T A:

Sinue Ferreyra Aranda

Director: Dra. Lucia Almeida Leñero

2010





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos del Jurado

<p>1. Datos del alumno</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Teléfono</p> <p>Universidad Nacional Autónomas de México</p> <p>Facultad de Ciencias</p> <p>Carrera</p> <p>Número de cuenta</p>	<p>Ferreyra</p> <p>Aranda</p> <p>Sinue</p> <p>58156018</p> <p>Universidad Nacional Autónoma de México</p> <p>Facultad de Ciencias</p> <p>Biología</p> <p>95266301</p>
<p>2. Datos del tutor</p> <p>Grado</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p>	<p>Dra.</p> <p>Lucia</p> <p>Almeida</p> <p>Leñero</p>
<p>3. Datos del sinodal 1</p> <p>Grado</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p>	<p>Dra.</p> <p>Ma. Engracia</p> <p>Hernández</p> <p>Cerda</p>
<p>4. Datos del sinodal 2</p> <p>Grado</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p>	<p>M. en C.</p> <p>Verónica</p> <p>Aguilar</p> <p>Zamora</p>
<p>5. Datos del sinodal 3</p> <p>Grado</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p>	<p>Biólogo</p> <p>Gonzalo</p> <p>Valdez</p> <p>Madero</p>
<p>6. Datos del sinodal 4</p> <p>Grado</p> <p>Nombre(s)</p> <p>Apellido paterno</p> <p>Apellido materno</p>	<p>Biólogo</p> <p>Genaro</p> <p>Gutiérrez</p> <p>García</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito.</p> <p>Título</p> <p>Número de páginas</p> <p>Año</p>	<p>Dendrocronología y estructura de <i>Pinus hartwegii</i> en la Cuenca del río Magdalena México D.F.</p> <p>57</p> <p>2010</p>

DEDICATORIA

A DIOS POR PERMITIRME TEMINAR ESTE TRABAJO

A MIS PADRES QUE CON SU PACIENCIA ME DIERON ANIMO PARA TERMINAR ESTE PROYECTO. GRACIAS POR SU COMPRESION Y SER EJEMPLO DE CONSTANCIA, DEDICACION Y EMPEÑO EN MI VIDA.

A MI FAMILIA POR SU APOYO, POR ANIMARME EN TODO MOMENTO Y POR ESTAR CONMIGO, GRACIAS FABIOLA, DENIA, DANY, YOYIS, Y MIS CUÑADOS. GRACIAS DIANA POR ESTOS MOMENTOS.

A LA DRA. LUCIA ALMEIDA, GRACIAS POR SUS ENSEÑANZAS Y SU PACIENCIA.

A MIS TUTORES QUE ME LLEVARON A CULMINAR ESTA TESIS, GRACIAS POR SU AYUDA, SU PACIENCIA Y SU TIEMPO.

AL CAND. A DOCTOR GENARO GUTIERREZ POR SU ENSEÑANZA DE LA DENDROCRONOLOGIA.

A LA M. EN CIENCIAS VERONICA AGUILAR POR SU AMISTAD Y POR SU AYUDA INCONDICIONAL EN TODO EL PROCESO DE ESTA TESIS.

A MIS COMPAÑEROS DE LA FACULTAD, JOSE, INTI, LUIS, VICTOR, CARLOS, GRACIAS POR TODOS LOS BUENOS MOMENTOS DE LA CARRERA.

CONTENIDO

INDICE	Página
RESUMEN	6
INTRODUCCION	7
1 ANTECEDENTES	
1.1 Estructura de bosques	8
1.2 Anillos de crecimiento	10
1.3 Dendrocronología	12
1.4 <i>Pinus hartwegii</i>	15
OBJETIVOS	17
HIPOTESIS	
2 AREA DE ESTUDIO	
2.1 Historia	18
2.2 Ubicación geográfica	19
2.3 Fisiográfica y topografía	
2.4 Geología	20
2.5 Suelos	
2.6 Hidrologia	
2.7 Clima	21
2.8 Vegetación	22
3 METODOLOGIA	
3.1 Análisis estructural	23
3.2 Análisis dendrocronologico	24
4 RESULTADOS	
4.1 Estructura diamétrica del bosque y de las comunidades	28
4.3 Estructura vertical del bosque	30
4.4 Análisis de correlación	32
4.5 Análisis a diferentes altitudes	34
4.6 Análisis dendrocronológico	36

4.7 Cronología	39
4.8 Análisis de relación clima-crecimiento	41
5 DISCUSION Y CONCLUSIONES	45
LITERATURA CITADA	51
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	55

RESUMEN

Se realizó una descripción estructural, del bosque de *Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena México, D.F. Dicha especie es característica de ambientes de alta montaña en México y Centroamérica, su hábitat está limitado a las condiciones ambientales de bajas temperaturas y escasa precipitación. El análisis de estructura diamétrica y vertical (alturas) sugiere que hay regeneración en el bosque que tiene una gran proporción de individuos con diámetros menores a 30 cm. En altitudes mayores a los 3,600 m snm, otros factores ambientales como la temperatura y precipitación pueden influir en el crecimiento de esta especie en estas zonas altas. No hay relación directa entre el crecimiento en altura y diámetro de los árboles. La edad de los árboles está mejor relacionada con los diámetros que con las alturas. Se realizó un análisis dendrocronológico para determinar la relación entre clima y el crecimiento de los árboles. Se tomaron 2 virutas por individuo a 40 árboles. Las virutas fueron secadas, pulidas y fechadas utilizando los criterios dendrocronológicos tradicionales. Para generar una cronología del sitio, fueron fechadas 12 virutas de las 80 muestreadas. Las estadísticas básicas de la cronología indican la existencia de un patrón de crecimiento común en este tipo de bosque. Un análisis de correlación entre la cronología de sitio y datos de temperatura y precipitación de 2 estaciones meteorológicas cercanas al sitio, indican que el crecimiento radial de *Pinus hartwegii* está influenciado por las condiciones climáticas de la primavera. La mayor correlación fue con la precipitación del mes de abril del año presente de crecimiento. El análisis de sensibilidad media demostró que los árboles están dejando de ser sensibles a las condiciones climáticas, por lo que el factor que puede estar limitando el crecimiento radial en los árboles en la actualidad, es la contaminación atmosférica del Valle de México.

INTRODUCCION

La cuenca del río Magdalena (CRM) en el D.F. fue decretada en 1932 como “Zona Protegida Forestal Cañada de Contreras”. Basándose en su importancia como una de las principales áreas de recarga de los mantos acuíferos de la Ciudad de México, cobra interés para realizar trabajos científicos. A lo largo de las últimas cinco décadas, el área ha sido utilizada como zona de esparcimiento; sin embargo, también su riqueza forestal se usa inadecuadamente. Por su condición de Área Protegida y por tener ecosistemas de gran diversidad, se elaboró durante el periodo de 1995-1997 un programa de manejo para la conservación de la zona protegida forestal “Cañada de Contreras” cuyo objetivo principal fue la conservación y permanencia de los ecosistemas que lo integran (Carabias-Ibarrondo, 1976).

Una de las tareas centrales de la ecología forestal es describir y estimar el proceso de crecimiento y de productividad de las especies, así como determinar los factores bióticos y abióticos que los afectan. Los detalles acerca del establecimiento, crecimiento, reproducción y muerte de los individuos en una población, representan los elementos básicos para el estudio demográfico de la especie (Harper, 1977). Sin embargo el ciclo de vida y el tamaño de los árboles hacen que muchos de los métodos convencionales empleados en biología de poblaciones sean poco útiles para obtener dichos datos. Por esta razón en el presente trabajo, se pretende demostrar cómo el estudio de los anillos de crecimiento arbóreos es una herramienta de utilidad para el estudio de *Pinus hartwegii*.

Uno de los tipos de bosque que están presentes en esta área, es el bosque de *Pinus hartwegii*. A esta conífera se le conoce como pino de las alturas (Eguiluz, 1978), distribuyéndose en México entre los 3700 y 4300 m snm. Esta especie se desarrolla en altitudes en las que otras especies de pinos no pueden crecer.

Utilizando técnicas dendrocronológicas se pueden estudiar parámetros de la dinámica del bosque como: relación edad / diámetro.

En México los estudios dendrocronológicos han sido poco desarrollados., En la actualidad se han construido más de 40 cronologías principalmente del género *Pinus* y *Pseudotsuga*, generadas en su mayoría por investigaciones extranjeras. Se han realizado algunos estudios en la Cuenca del Río Magdalena sobre la descripción de la estructura del bosque de *Pinus hartwegii*, Sin embargo no existe ningún estudio dendrocronológico formal de *Pinus hartwegii*. El presente trabajo es una contribución

al conocimiento de la estructura y los patrones de crecimiento del bosque de *Pinus hartwegii* en la CRM.

1.- ANTECEDENTES

1.1. Estructura de los bosques

La historia de la dinámica poblacional de un bosque puede inferirse de la estructura de edades de la población actual. La formación anual de anillos de crecimiento de los árboles, permite determinar la edad de un individuo y hace posible el conocimiento de dicha dinámica en especies arbóreas.

El crecimiento de un árbol es simulado con una relación que describe el crecimiento en diámetro a través del tiempo como una curva teórica (normalmente de tipo sigmoideal) cuyos parámetros se calculan con datos obtenidos que registran la historia de crecimiento de los árboles a través del tiempo. A incrementos en el diámetro corresponden aumentos en altura y en densidad foliar que son calculados usando relaciones alométricas (es decir, relaciones o funciones que asignan a un incremento en diámetro un incremento proporcional en altura y densidad foliar). Esta curva de crecimiento representa el crecimiento máximo o potencial que bajo condiciones ambientales óptimas podría obtener un árbol. Por supuesto, este crecimiento se ve afectado por las condiciones ambientales y ecológicas predominantes en el terreno. Cada árbol compite con los demás por los recursos ambientales limitados: luz, humedad del suelo y temperatura y su crecimiento se ve restringido si alguno de estos recursos no se encuentran en sus valores óptimos.

El crecimiento de los árboles no es continuo, esto se manifiesta especialmente en la zona templada donde los periodos de desarrollo de los arboles se alternan con periodos de latencia. Si se considera el crecimiento en altura, el diámetro a la altura del pecho (DAP), o en volumen, como una función de la edad del árbol, se verá que estas magnitudes muestran un crecimiento similar a una curva en forma de S, que al principio es cóncava y después convexa (Klepac, 1983).

La cantidad de reservas materiales que acumula el árbol durante el último año son de gran importancia para el incremento en altura, que está menos influenciado por los factores ambientales que por el crecimiento en diámetro. Dentro de ciertos límites, el incremento en diámetro es mayor cuando hay más espacio (Klepac, 1976).

Los procesos ecológicos asociados a la dinámica de bosques son por lo general lentos y variables por lo que a menudo necesitan ser estudiados a largo plazo. En este

sentido el análisis de crecimiento arbóreo permite inferir las condiciones pasadas que determinaron la composición y estructura presente de un rodal (Kitzberger et al., 2000). La estructura de un bosque se define como una descripción del comportamiento de los diferentes estratos de vegetación en función de variables, como el diámetro de los árboles, su altura, la cobertura de sus ramas y otros datos dasonómicos.

Daniel *et al.* (1982) propone 3 tipos de distribución diamétrica en un bosque:

- a) La mayoría de las especies tienen una distribución diamétrica cercana a la “J” invertida, donde el mayor número de individuos se concentra en las clases diamétricas inferiores, disminuyendo a medida que se acercan a las clases diamétricas mayores, este tipo de distribución diamétrica se clasifica dentro de los rodales de edades diferentes (no coetanos).
- b) Algunas especies tienen una distribución parecida a la de rodales irregulares o escalonada, donde no se presentan individuos en las clases diamétricas intermedias.
- c) Otras especies tienen una distribución de “J” donde solamente se presentan individuos en las categorías diamétricas superiores con escasa o nula presencia en las clases inferiores.

De acuerdo a estas clasificaciones, Shulz, 1960; en: Pérez-Jiménez y Sarukhán, 1970, indica que una comunidad o población dinámicamente estable tiene una estructura diamétrica parecida a la “J” invertida, es decir, se regenera en forma continua.

La estratificación vertical revela dos tipos de distribución de las especies (Boyas-Delgado, 1992):

- a) Una distribución continua, en las que las especies pueden estar representadas en dos o tres estratos de forma continúa.
- b) Una distribución localizada donde las especies se presentan en un solo estrato.

Para Spurr y Barnes (1982), el crecimiento en diámetro de un árbol está inversamente influido por la densidad, ya que el diámetro disminuye con el aumento de la misma. Para definir la estructura vertical de un bosque, se pueden utilizar dos variables; altura del arbolado y densidad arbórea.

1.2. Anillos de crecimiento

El crecimiento anual de un árbol es el resultado de procesos bioquímicos complejos y correlacionados. Los árboles interactúan con el micro ambiente de la hoja y de la superficie de la raíz. El hecho de que exista una relación entre estas condiciones tan localizadas y parámetros climáticos de mayor escala da una idea de la influencia total del clima en el crecimiento anual. Este, se puede ver afectado por muchos aspectos como: insolación, precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad (Sinteriza, 1976; Bradley, 1985). Además, hay otros factores no climáticos que pueden tener influencias tales como la competencia, la herbivoría y las condiciones edáficas.

La formación de los anillos de crecimiento anuales está relacionada con las condiciones ambientales. Cada año un árbol agrega una capa de madera a su tronco formándose así anillos anuales los cuales pueden ser observados en un corte transversal. La madera nueva crece a partir del cambium vascular entre la vieja madera y la corteza, cuando la humedad es abundante, el árbol dedica su energía a producir nuevas células de crecimiento de gran tamaño, al avanzar el verano, estas disminuyen de tamaño.

El contraste entre las células viejas más pequeñas y las células nuevas más grandes del año siguiente es lo que establece un anillo, haciendo posible su identificación. Así en climas donde hay diferencias estacionales, se producen células grandes y de paredes delgadas en primavera y células más pequeñas y de paredes gruesas en invierno. En los climas de los trópicos, el crecimiento es continuo y constantemente se agregan células a la madera sin que se hagan evidentes los anillos. Como los árboles reaccionan de preferencia a los cambios de temperatura, cualquier cambio queda registrado en los anillos de crecimiento de los árboles. Esto se observa fácilmente en las maderas petrificadas pudiéndose reconstruir las condiciones ambientales y

climáticas en que se desarrollaba el árbol y por tanto inferir datos sobre los climas del pasado así como de otras condiciones ambientales.

El clima es uno de los factores que más influencia tiene sobre el crecimiento de los árboles. En los años en que la cantidad de precipitación y la temperatura son adecuadas el árbol crece más y el anillo correspondiente será relativamente más ancho que en los años en que el clima es particularmente severo, por lo que el árbol crece menos, produciendo anillos angostos.

El espesor de los anillos está condicionado por factores, tanto internos como externos. Cuando se pueden establecer relaciones matemáticas entre el grosor de estos anillos y algunas variables climáticas, es posible extender los modelos hacia el pasado y obtener reconstrucciones climáticas de muchos siglos.

Un anillo de crecimiento está conformado por madera temprana y tardía, la primera es la que se ve favorecida por condiciones como disponibilidad de agua y altas temperaturas, que dan como resultado un rápido crecimiento en diámetro, al disminuir la temperatura durante la segunda mitad del año, el crecimiento en diámetro va disminuyendo, produciendo madera densa marcando así la diferencia con el anillo del año siguiente (González-Rosales, 2001).

El crecimiento en diámetro está en función del crecimiento en radio, el cual depende de la división celular del cambium, que produce células de xilema para que estas a su vez, generen madera, que en las coníferas producen los anillos anuales de crecimiento (Klepac, 1983).

Monrey (1977), destaca que en condiciones normales, un árbol produce un anillo por año, pero que excepcionalmente produce varios anillos por año, conocidos como anillos falsos, dichos anillos se forman por diferentes causas como:

- Por una segunda floración en un periodo de crecimiento o después de la caída de hojas
- Por un crecimiento discontinuo en el verano, que vuelve a ser activo al final de la misma estación de crecimiento.

Klepac (1983), menciona algunos factores que intervienen en el espesor de los anillos anuales:

- Disponibilidad de luz

- Temperatura
- Humedad
- El periodo vegetativo
- Calidad del suelo
- Duración de la estación de crecimiento
- Competencia
- Fotoperiodo
- Factores externos como la defoliación por insectos
- Vientos
- Incidencias de fenómenos meteorológicos anómalos

1.3 Dendrocronología

La ciencia que estudia las secuencias de los anillos de crecimiento se llama dendrocronología que proviene del griego: *dendros* que significa árbol, *chronos* tiempo y *logos* conocimiento. Estudio de los anillos de crecimiento de especies arbóreas, reflejan los eventos acontecidos en la vida de un árbol.

Los griegos y los romanos, ya conocían el ritmo anual del crecimiento de los árboles, mas tarde al observar que no todos los anillos eran iguales se intento relacionar estas diferencias con el clima. Se desarrollaron métodos que permitieran identificar las irregularidades de los anillos de crecimiento conocidos como anillos falsos.

En el siglo XVIII, diversos naturalistas que trabajaron de manera independiente como Duhamel y Bufón en Francia, Burgsdorf en Alemania y Linneo en Suecia, que contando los anillos de los troncos caídos en 1737, observaron características similares de algunos de ellos en años muy específicos.

Posteriormente el ruso Svedov en 1892, el holandés Kapteyn en 1914 y el norteamericano Douglass en 1914, usaron las variaciones en el ancho de los anillos, causadas por variaciones ambientales, como herramienta cronológica para identificar el año en que un anillo se formó (Villanueva-Díaz et al., 2000).

Es una herramienta de gran utilidad para reconstruir las variaciones climáticas y los cambios ecológicos en el pasado. El uso de técnicas dendroclimáticas en una región o área determinada está dada por la existencia de especies longevas (más de 100-200

años), con anillos anuales visibles y con un crecimiento radial influenciado por variaciones climáticas (Fritts, 1976).

La dendrocronología es una disciplina relativamente reciente, se inicio formalmente a principios del siglo XX con los trabajos pioneros de Douglass, quien a partir de 1901, estableció los principios básicos de la dendrocronología y en 1937 organizó el Laboratory of Tree-Ring Research en Tucson, Arizona (Fritts y Swetnam, 1989). Douglass sugirió la influencia de los ciclos de las manchas solares sobre el clima y el conocimiento de este mediante los anillos de crecimiento de los árboles (McGinnies, 1963; LaMarche y Fritts, 1972 en: Fritts, 1976). Douglass observó en un corte de madera de pino, variaciones en el ancho de sus anillos, lo cual parecía estar influenciado por deficiencias de humedad, razonó que si lo anterior era verídico, entonces los años secos se registrarían como anillos angostos y por lo tanto podrían utilizarse para reconstrucciones climáticas. (Villanueva-Díaz et al., 2000)

En el siglo XX en la década de los sesenta, el francés Hubert Polge desarrollo una novedosa técnica de estudio en los anillos de crecimiento: la densitometría (Polge, 1966 y 1970; Parker y Meleskie, 1970; Schweingruber y Fritts, 1978; en: Villanueva-Díaz et al., 2000). Utiliza rayos X para determinar los cambios en la densidad de la madera. Los máximos y mínimos de la densidad coinciden con las épocas desfavorables y favorables para el crecimiento, respectivamente. La densidad de la madera da información sobre sus diferentes propiedades, como el grosor de las paredes celulares, el tamaño y la densidad de los vasos o ductos, la porción de fibras y el diámetro del lumen. Todos estos parámetros reflejan con mayor precisión el impacto de las variables ambientales en la formación de un anillo de crecimiento (Rincón y Huante, 1989).

El uso de la dendrocronología está limitado a determinadas especies arbóreas y arbustivas capaces de producir tejido leñoso, que como ocurre en el caso de los bosques templados, permite sentar la base metodológica en una serie de principios básicos, listados a continuación:

Principio de uniformidad. – Establece que los principios físicos y biológicos que inciden en el crecimiento de un árbol son siempre los mismos a lo largo del tiempo.

Principio de los factores limitantes. – Los factores limitantes (suelos, actividad humana, condiciones climáticas, etc.) intervienen en el crecimiento, este principio es fundamental en la dendroclimatología ya que se deben localizar los árboles más

representativos que sean más vulnerables a los cambios climáticos. Estos árboles son los que mejor reflejan la señal climática, que posteriormente permitirá la reconstrucción de climas pasados.

Principio de crecimiento agregado. – Establece que cualquier serie de crecimiento en los anillos de los árboles puede ser estudiada tomando en cuenta diferentes factores (ambientales, antropicos, etc.), como son:

- El año en que se genera el anillo
- Crecimiento asociado a la edad de cada especie
- Clima (temperatura y precipitación)
- Perturbaciones endógenas (propias del bosque) como por ejemplo, caída de árboles, aperturas de claros, aumento en la cobertura vegetal, etc.
- Perturbaciones exógenas al bosque, como heladas fuera de temporada, plagas, incendios, talas, etc.
- Contaminantes antropogénicos (CO₂)
- Diferentes procesos ajenos (errores en la medición)

Una herramienta básica para la dendrocronología es el fechado cruzado, que representa gráficamente las variaciones en el ancho de los anillos. Para realizar este, se construye un esqueleto por cada muestra por medio de la comparación y sincronización de los mismos.

Para el análisis dendrocronológico el principio más importante es la sincronía anual, esto es, todos los anillos deben ser localizados correctamente en el año de su formación. Para realizar un fechado cruzado se debe detectar y corregir cualquier asincronía debida a la presencia de anillos falsos o ausentes, o a errores de observación o de conteo (Fritts, 1976; Fritts y Swetnam, 1989).

Un principio importante y relacionado con la estructura de los bosques es la “estandarización”, que considera que el ancho de los anillos no solo varía como respuesta a los cambios ambientales, sino también con el incremento en el diámetro y en la edad del árbol.

Otro principio que asegura el uso apropiado de las variaciones en el espesor de los anillos de crecimiento establece que cada especie dependiendo de sus factores hereditarios, puede crecer y reproducirse en un cierto intervalo de habitats que se conoce como amplitud ecológica (Fritts, 1976). Especies con amplitudes ecológicas

diferentes pueden estar limitadas por los mismos factores cuando crecen en condiciones similares.

En México los estudios dendrocronológicos se han realizado a partir del trabajo que Shulman efectuó en 1944 en Durango, con fines arqueológicos (Scott, 1966, en: Villanueva-Díaz et al., 2000). A partir de entonces se han realizado diferentes tipos de estudios dendrocronológicos. Sin embargo, si se toma en cuenta la gran diversidad de especies arbóreas que alberga nuestro país, son escasos los estudios con anillos de crecimiento arbóreo (Rincón y Huante, 1989).

En las regiones templadas y subtropicales del norte de México se han generado más de 40 cronologías. Las únicas reconstrucciones climáticas realizadas específicamente para México a partir de anillos de árboles son estimaciones de precipitación y de índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) para el área fronteriza del norte de Sonora (Villanueva-Díaz et al. 1996), sin embargo Douglas en 1980 usó las cronologías más extensas de California, Baja California, Chihuahua y Durango para reconstruir variaciones en temperatura de la superficie del mar (SST) en el Océano Pacífico, cerca de Baja California. Estos trabajos son muy interesantes y permanecen como una de las reconstrucciones dendrocronológicas de SST de mayor calidad científica (Villanueva-Díaz et al., 2000).

La mayoría de cronologías de espesores de anillos arbóreos disponibles para México, se han generado en los bosques templados y subtropicales del noroeste. Las cronologías de anillos de árboles de México, resultan particularmente importantes, debido a que la mayoría de ellas están bien correlacionadas con la precipitación invernal y con los índices de El Niño/oscilación del sur (Villanueva-Díaz et al., 2000).

Existen cambios en los anillos de crecimiento asociados con la edad y con la geometría (relaciones alométricas) del árbol, de esta manera, los primeros que se forman en un individuo (los más cercanos a la medula) son, generalmente, más anchos que los formados posteriormente.

La dendroecología es aplicable especialmente en bosques templados debido a que la formación de anillos es rítmica y generalmente corresponde años calendario, lo que garantiza el control temporal de procesos, como el crecimiento, el establecimiento y la mortalidad (Kitzberger et al., 2000)

1.4 *Pinus hartwegii*

El *Pinus hartwegii* es una conífera, también conocida como “pino de las alturas”, que se encuentra en los picos y montañas más altas de México, siendo más frecuente su presencia en la Sierra Nevada (Eguiluz, 1978) (Fig. 1).

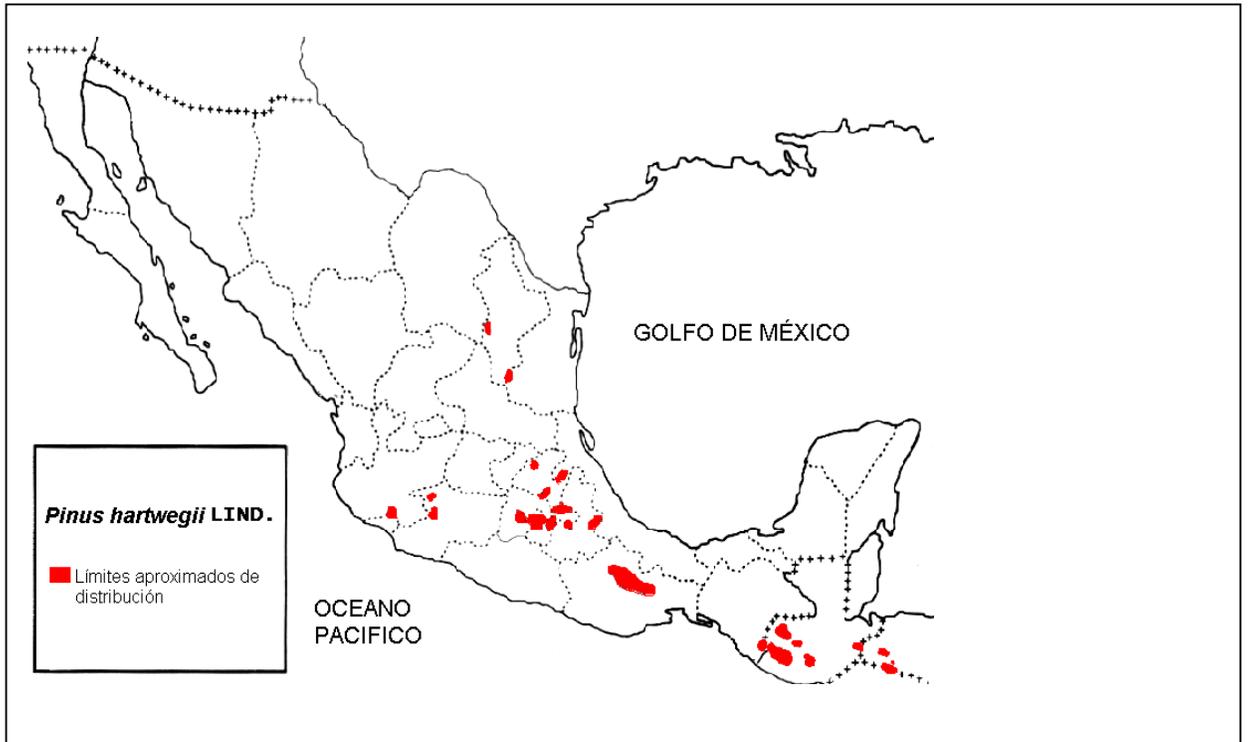


Figura1. Distribución de *Pinus hartwegii* en México. (Hentschel-Ariza, 1999).

Es una especie típica de zonas templadas, por lo que probablemente sea la especie de pino que alcanza menores diámetros en los bosques de México. Forma muchas veces masas puras, especialmente en los volcanes de la región central, donde por la altitud ya no prosperan otras especies de pinos (Eguiluz, 1978; Hernández, 1985 en: Solís, 1994).

Representa comunidades clímax y en las partes más bajas, alcanza entre 15 y 20 metros de altura, pero hacia los 4,000 m snm, el bosque es bajo y abierto, ya que los individuos que los constituyen alcanzan alturas de 5-8 m (Rzedowski, 1983). Entre los 3,700 y los 4,300 m snm, el *Pinus hartwegii* domina el estrato arbóreo debido a que esta mejor adaptado a las bajas temperaturas, a la pobreza del suelo, y a que no tiene competencia con el estrato arbustivo y muy poco con el herbáceo. A menor altitud compete con *Pinus moctezumae* (Santillan, 1991).

Pinus hartwegii crece preferentemente sobre suelos profundos, ricos en materia orgánica, buen drenaje y texturas franca y de migajón arenosa (Look, 1950 en: González, 2001). La madera de *Pinus hartwegii* es de color rojizo (blanco-amarillento), sin diferencia aparente entre albura y duramen, y se caracteriza por ser dura y pesada en cuanto a su densidad básica (Eguiluz, 1978).

Los anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* están dispuestos de manera regular, aproximadamente 2 anillos por centímetro; la madera de primavera es de color amarillo claro y de mayor grosor que la de verano, de color café; la transición es gradual; en sección transversal, los canales resiníferos se encuentran distribuidos en todo el anillo, pero son más abundantes en la madera de verano (Ortega, 1952 en: Solís-Pérez, 1994). Dentro de los factores físicos que afectan el crecimiento y la reproducción de *Pinus hartwegii* esta el fuego, Sarukhán y Franco (1981), manifiestan que aparte de los incendios forestales severos, los fuegos rasantes periódicos tienen un efecto importante sobre la capacidad de repoblación y sobre las tasas de crecimiento de individuos jóvenes de esta especie (Solís-Pérez, 1994).

OBJETIVO GENERAL

Efectuar un análisis dendrocronológico y estructural del bosque de *Pinus hartwegii* y relacionar el crecimiento de los árboles con variables climáticas en la cuenca del río Magdalena D.F.

OBJETIVOS PARTICULARES

Relacionar los parámetros de altura- diámetro- edades.

Obtener una cronología mediante el análisis de los anillos de .crecimiento

Analizar si existe alguna relación entre el crecimiento de *Pinus hartwegii* y los datos de temperatura y precipitación

HIPOTESIS

Si la especie *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, registra en los anillos anuales de crecimiento las variaciones del clima a lo largo del tiempo, esto se verá reflejado en el crecimiento de los árboles.

2. AREA DE ESTUDIO

Cuenca del río Magdalena

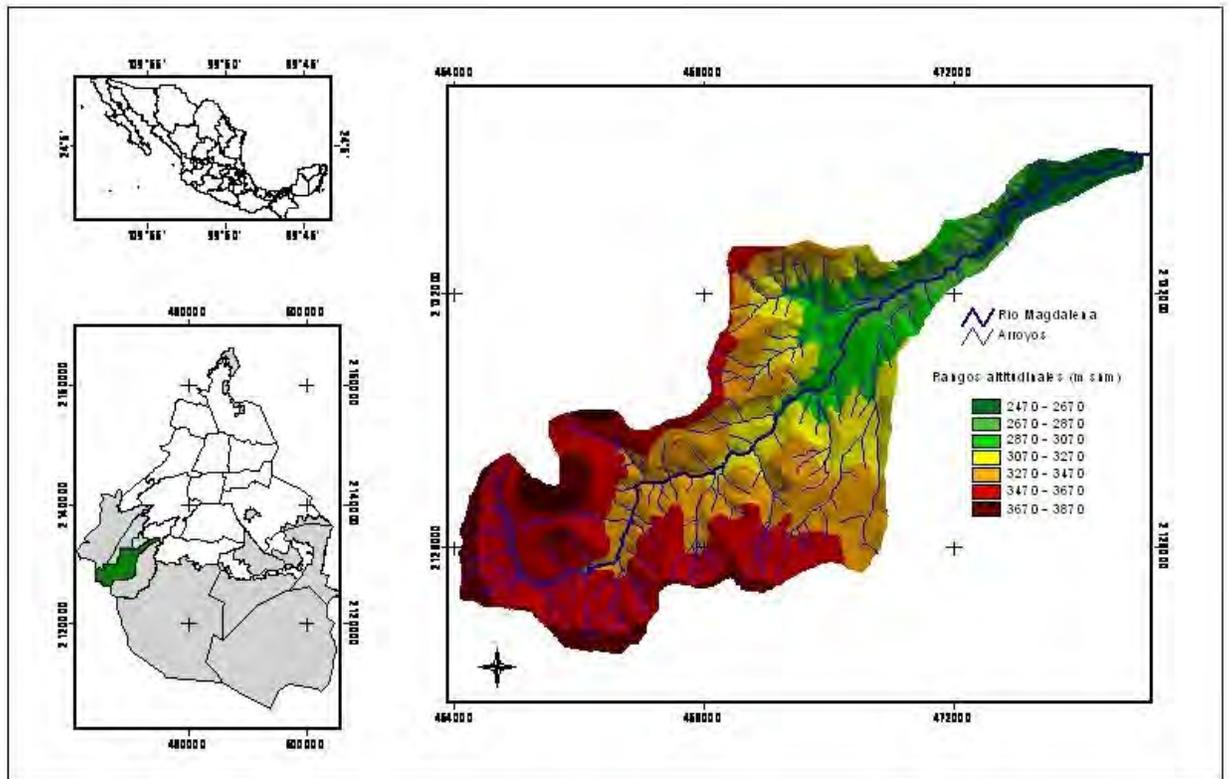


Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Magdalena en México D.F.

2.1 Historia

Aproximadamente entre 1315 y 1390, después de la fundación de Tenochtitlan, los Mexicas formaron una tribu que se ubicó en unas tierras en donde se encontraba una gran charca en cuyo centro había una roca, a este sitio se le nombró "Atlitic" (piedra en el agua). Así se fundó el centro urbano hoy conocido como Magdalena Contreras.

En la época de la colonia, los frailes dominicos fundaron un templo tomando como patrona a Santa Maria Magdalena, nombre tomado por los habitantes para llamar a su pueblo Magdalena Atlitic, con el tiempo se perdió el nombre de Atlitic. En la segunda década del siglo XVII, el español Tomás de Contreras puso una imagen de Jesús Nazareno, que con el tiempo se le conoció como "El señor de Contreras", y hasta hoy se nombra esta zona como Magdalena Contreras.

El río de la Magdalena fue muy importante en la vida agrícola e industrial de la región de 1776 a 1787. En 1897, las aguas del río Magdalena se aprovecharon en la

generación de energía eléctrica, que benefició a las fábricas de hilados y tejidos de la región. Antes de la Revolución Mexicana, las tierras pertenecían a la Hacienda de la Cañada, posterior a la revolución los sitios fueron repartidos entre los campesinos, que después fueron expropiados y convertidos en ejidos.

La empresa Loreto y Peña Pobre explotó el bosque de 1947 a 1982, en esa época se registró la tala más importante ya que los comuneros y ejidatarios vendían la madera a esta empresa. El bosque perdió el 40% de su potencial, lo que obligó a los comuneros a buscar nuevas áreas para el uso agrícola, pastoreo y áreas para vivienda. (Carabias-Ibarrondo 1976).

2.2 Ubicación geográfica

La cuenca del río Magdalena con 3,100 ha, se ubica dentro de la Cordillera Volcánica Transmexicana (CVT) en el Valle de México en la vertiente occidental de la sierra de las Cruces entre los 2600 y 3870 m snm. La Zona Protegida Forestal limita al norte con los pueblos de San Bartolo Ameyalco y Santa Rosa Xochiac, al sur con los montes de la Hacienda de Eslava y el Ejido San Nicolás Totolapan, al oriente con el pueblo de San Nicolás Totolapan y al poniente con el Desierto de los Leones, entre la Cruz de Coloxtitla y el cerro de San Miguel (Carabias-Ibarrondo 1976).

2.3 Fisiografía y topografía

Existen tres divisiones determinadas por la condición topográfica y la estructural; región montañosa, de talud transicional de la montaña y una región baja. La primera se subdivide en una zona montañosa y una de tierras altas; comprende las mayores elevaciones de la sierra de las Cruces, la zona de tierras altas abarca de los 3,000 a los 3,500 m snm, y está representada por grandes macizos rocosos (Carabias-Ibarrondo, 1976). La zona de talud transicional de la montaña, entre los 2600 y los 3400 m snm, presenta pendientes abruptas, la parte inferior de esta región está formada por material coluvial y aluvial.

La región baja correspondiente al nivel de la base del río Magdalena se localiza entre los 2240 y 2500 m snm. Debido a sus características topográficas, se localizan numerosas barrancas y cañadas que se originaron debido a las corrientes de los arroyos, afluentes del río Magdalena así como de éste mismo.

2.4 Geología

El basamento de la cuenca del río Magdalena está constituido por rocas andesíticas. La sierra se originó por emisiones pacíficas de lavas ácidas; existen indicios de conos volcánicos con estructuras muy erosionadas o sepultadas por formaciones posteriores, como el cerro de San Miguel y el de la Palma. En los lugares con poca pendiente como las partes bajas de los cerros de San Miguel y Magdalena, la andesita está cubierta con un revestimiento de material arcilloso producido por la alteración de la misma roca (Carabias-Ibarrondo, 1976).

El cauce del río Magdalena se ajusta por completo a la estructura derivada de la falla que condiciona su cuenca alta, cuya manifestación más importante es el Cañón de Contreras, resultando de un afalleamiento en bloques en donde el río se encajona en estrechas márgenes. Corre de poniente a oriente, y se compone de dos partes, la primera corresponde a la zona boscosa con andesitas y la segunda es la que se encuentra en la zona urbana, en la parte superior de ésta hay tobas y en la parte inferior se localizan los basaltos.

2.5 Suelos

El suelo es principalmente Andosol, formado a partir de materiales ricos en vidrios volcánicos, generalmente ácidos y con una topografía accidentada. Estos suelos fijan fosfatos y son fáciles de erosionar, se consideran como un buen soporte para los bosques de coníferas.

Los tipos de suelo son: Andosol húmico de textura media (limos) se encuentra en pendientes planas a ligeramente onduladas Th/2A. Es muy abundante este tipo de suelo en la Cañada de Contreras, que se extiende desde la zona urbana al primer Dinamo. Andosol molico de textura media, limosa y con pendiente plana a ligeramente ondulada, Tm/2A. Este suelo se localiza en áreas determinadas en el límite este de la delegación (Carabias-Ibarrondo, 1976).

2.6 Hidrología

El río Magdalena nace en las faldas del Cerro de la Palma, en la serranía de las Cruces; sus afluentes principales son los ríos Eslava, Texcalatlaco, Anzaldo y Guadalupe; después de recibir a todos estos afluentes se une al río Mixcoac, ya entubado a la altura de Xoco en Coyoacán, para juntos formar el río Churubusco, el

cual desemboca en el lago de Texcoco y después sale del valle de México por el gran canal (Carabias-Ibarrondo 1976).

El río Magdalena es alimentado por numerosos manantiales:

- Pericos- Localizado aprox. a 400 m al W del tercer Dinamo en la parte norte de río Magdalena.
- Mal Paso – Se localiza en la margen derecha de la Cañada de las Ventanas en la ladera norte del río Magdalena.
- Apaxtla – Se localiza en la margen derecha de la cañada de las Ventanas, al sur del cerro Pahueyxiotl.
- Las Ventanas – Se localiza en la margen izquierda de las cañada de las Ventanas en la ladera norte del río Magdalena.
- Potrero – Son dos manantiales que nacen en la barranca del mismo nombre, en la vertiente sur del río Magdalena.
- Temascalco y San José – Se localiza en la norte de la presa Aile y sus aguas van al cruce del río Magdalena a la altura del primer Dinamo.
- Cerreria – Se localiza aprox. a 1 Km al sur de la presa Aile en la cual vierten sus aguas.
- San Miguel – Se localiza al noroeste del Cerro de la Palma en la margen izquierda de la barranca de San Miguel; dicho manantial se deriva por un cauce hasta la presa Barbechos.
- Los Cuervos – Se encuentra en la margen derecha del arroyo los Cuervos, aprox. 200 m al oriente de la Presa Barbechos.
- Cieneguillas – Son numerosos manantiales que como su nombre lo indica constituyen la zona pantanosa; se localiza al poniente del cerro de la Palma, formando el nacimiento del río Magdalena.

2.7 Clima

De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen (1948) Modificado por García (1988), en la parte baja a altitudes menores a 2800 m. snm, se presenta un clima templado subhúmedo C(w₂)(w) ig, cuya temperatura media del mes mas frío está entre -3 y 18 °C, la del mes mas caliente es mayor de 6.5° C y la temperatura media anual entre 12° y 18° C La mayor precipitación se registra en los meses de verano., el porcentaje de lluvia invernal es menor del 5% de la total anual. Pertenece al grupo de los más húmedos de los subhúmedos, es decir presenta un cociente de precipitación sobre temperatura (P/T) mayor que 55. La oscilación anual de las temperaturas

medias mensuales está entre 5° y 7°C, es decir tiene poca oscilación térmica, el mes más caliente se registra antes de junio.

En las partes más altas se registra el tipo frío más húmedo de los subhúmedos, la fórmula climática es: Cb'(w2)(w) ig. [E(T)HC (w2)], ocupando solo el 4% de las subcuencas. Debido a que este último tipo se presenta en México por altitud y no por latitud, se agrega la letra "H" a la fórmula climática. Este subtipo solo difiere del anterior por presentar un verano fresco corto "b", y que la oscilación térmica es menor a 5° C isotermal. Este clima se localiza en la zona del tercer Dinamo y el Desierto de los leones (Dobler 2010)

La región se ve afectada por sistemas de circulación atmosférica que definen una época húmeda (junio a octubre) y seca (abril a mayo). La temperatura media anual tiene su máximo en el mes de mayo. La precipitación se concentra principalmente en los meses de mayo a octubre donde se registra el 91 % de lluvia con respecto a la total recibida en el año. El número de meses secos es de 5 a 6, y el de los húmedos es de 6 a 7. El régimen de lluvia que prevalece en la zona, es estival.

2.8 Vegetación

La cuenca del río Magdalena presenta un marcado gradiente altitudinal que va de los 2,500 en la parte baja a los 3,870 m snm en la parte alta, lo que favorece el establecimiento de diferentes comunidades vegetales con algunas asociaciones (Cuadro 1), como el bosque *Pinus hartwegii* en la parte alta, el de *Abies religiosa* en la parte media y el bosque mixto y *Quercus*, en la parte baja. Además es posible encontrar pequeños manchones de matorral de *Furcraea*, pastizales, plantaciones forestales y agricultura. (Nava, 2003).

Bosque	Asociación vegetal
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	<i>Muhlenbergia quadridentata-Pinus hartwegii</i>
	<i>Festuca tolucensis-Pinus hartwegii</i>
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	<i>Acaena elongata-Abies religiosa</i>
	<i>Roldana angulifolia-Abies religiosa</i>
	<i>Abies religiosa-Senecio cinerarioides</i>

Bosque mixto y de <i>Quercus</i>	<i>Abies religiosa-Quercus laurina</i>
	<i>Quercus laurina-Quercus rugosa</i>
	<i>Pinus patula-Cupressus lusitanica</i>

Cuadro 1. Tipos de bosques presentes en la cuenca del río Magdalena con sus asociaciones vegetales (Nava, 2003).

5. METODO

5.1 Análisis estructural

Se seleccionaron en el bosque de *Pinus hartwegii* sitios al azar. En cada sitio georeferenciado, se colocó un cuadrante de 25 X 25 m (625 m²) registrando la orientación y altitud del cuadrante donde se tomaron los siguientes datos estructurales para el conjunto de árboles; diámetro normalizado (DN) con una cinta diamétrica, altura total del árbol (calculada) y medición de las ramas más largas en ambos ejes (X y Y).

Para obtener la estructura diamétrica se determinaron clases cada 10 cm, empezando la clase inferior a partir de 5 cm, que fue el diámetro mínimo.

Para la estructura vertical, las distintas alturas se agruparon en clases de 2 m a partir de esta altura mínima, en cada una de las clases se registró el número de árboles por cuadrante.

Los datos de los árboles (DN y Altura) se organizaron por cuadrante y por comunidad y se capturaron en EXCEL para su posterior manejo y análisis

Se realizaron graficas de distribución dimétrica y vertical del bosque de *Pinus hartwegii*, así como de las dos asociaciones que presenta este tipo de bosque (*Muhlenbergia quadridentata-Pinus hartwegii* y *Festuca toluensis-Pinus hartwegii*).

Posteriormente se realizaron análisis de correlación con el programa EXEL entre (DN-altura, DN-edad y edad-altura) y por medio del programa EXCEL se hicieron las gráficas correspondientes para el bosque en general y para cada una de las asociaciones.

Se realizaron gráficas que muestran la distribución de DN, alturas y edades en las diferentes altitudes muestreadas.

5.2 Análisis dendrocronológico

Se seleccionaron 12 de los cuadrantes al azar y en cada uno de estos se tomaron los 4 árboles de mayor DN para extraer una muestra de sus anillos de crecimiento (viruta) con un taladro de Pressler marca Haglöf (Fig. 3a).



Figura 3 a) taladro de Pressler marca Haglöf b) introducción del taladro en el tronco del árbol c) extracción de muestra d) colocación de muestras en popotes.

Paso seguido se introdujo el taladro lo más horizontalmente posible en el árbol a la altura del pecho (Fig. 3 b). Posteriormente se retiró la muestra (viruta) del taladro (Fig. 3 c).

Se tomaron 2 muestras por cada árbol. Una vez obtenida la muestra, el orificio dejado por el taladro se selló con cera de Campeche para evitar la entrada de hongos o insectos. Cada muestra se colocó en popotes sellados por ambos lados para su transporte (Fig. 3 d).

Las muestras fueron retiradas del popote y secadas a temperatura ambiente, una vez secas, se colocaron sobre rieles de madera y se pegaron con resistol blanco. Para hacer más visibles los anillos, las virutas se pulieron con lijas de diferentes tamaño de grano (150, 320, 650, 1200), empezando con la lija de grano más gruesa (150) y terminando con la de grano más fina (1200).

Posteriormente, con la ayuda de un microscopio estereoscópico se contaron los anillos de la corteza hacia el centro. Los intervalos de cada 10 anillos se marcaron con un punto en el centro

del anillo correspondiente, los de cada 50 años dos puntos y los de cada 100 años tres puntos, esto con el fin de facilitar el conteo de los anillos al microscopio (Fig. 4).

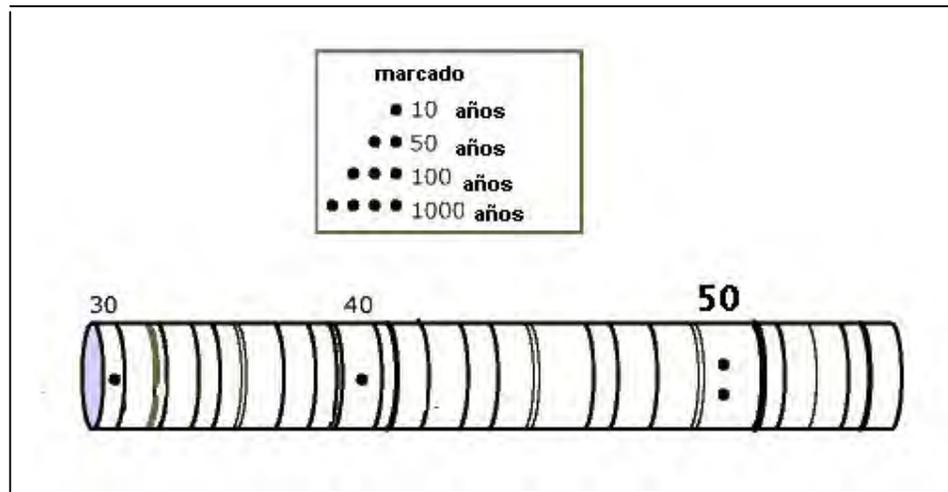


Figura 4. Marcado de puntos de referencia para leer al microscopio.

Con el propósito de encontrar un patrón de concordancia entre las diferentes muestras de anillos se representó en un papel milimétrico la diferencia entre anillos cortos y largos y se realizó el "skeleton-plot". Este método consiste en trazar líneas para anillos muy angostos y muy anchos, lo cual permite resaltar variaciones muy evidentes en el patrón de crecimiento entre anillos. Entre más pequeño sea el anillo, más larga será la línea trazada en el papel. Después se asignan periodos de 10 años, y para cada periodo se localizan los 2 anillos más cortos de esa década, que se esquematizan en el papel milimétrico con líneas largas (Fig. 5).

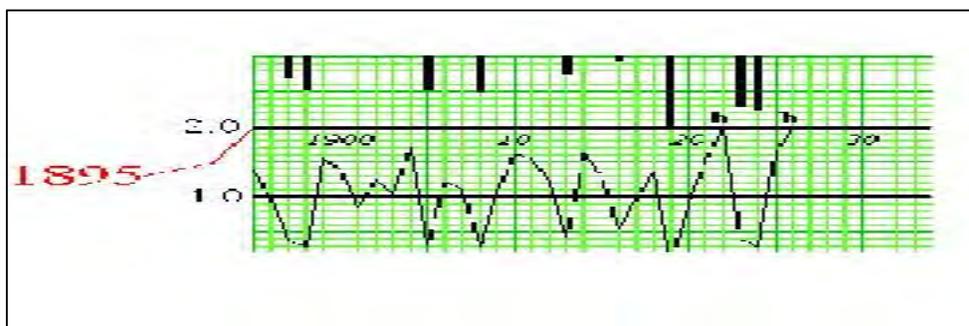


Figura 5. Esqueleto (skeleton-plot) representando el ancho de los anillos de las muestras.

Fue construido un esqueleto "maestro" representativo del sitio utilizando los esqueletos de todas las muestras, en el quedaron representados los anillos más cortos y más largos que aparecieron en la mayoría de muestras. Con este procedimiento se detectó la ausencia de anillos y presencia de anillos falsos (Frits, 1976). De esta forma se eliminaron errores de lectura por anillos falsos o

ausentes, ya que, al identificar un anillo muy pequeño presente en la mayoría de muestras, fue posible corregir otras en donde ese anillo está traslapado un año antes o uno después, y fue posible ubicar un mismo año identificado en todas las muestras y así obtener una edad correcta de los árboles para su medición posterior.

Para medir las muestras se utilizó un micrómetro con platina de fase deslizante conectado a una computadora que tiene instalado el programa TRIMS (Tree Ring Incremental Measuring System) el cual se utiliza para realizar las mediciones de las muestras y almacenarlas en formato ASCII. Los archivos ASCII fueron editados y manipulados posteriormente utilizando el programa "Bloc de Notas" de Windows 98 y EXCEL.

Se colocó la muestra en la platina deslizante para leerse de la médula hacia la corteza, se dio inicio al comando de medición en el programa TRIMS, y se comenzó a deslizar la platina. Como punto de referencia se tenía en el microscopio estereoscópico un ocular graduado, al recorrer el punto desde el inicio de la madera temprana hasta el final de la madera tardía se obtuvo la medida del anillo en micras presionando el botón del micrómetro. Este procedimiento se repitió en toda la muestra accionando el botón cada vez que se terminaba un anillo, se guardó el dato obtenido en formato ASCII, para posteriormente verificar el fechado y medición en el programa COFECHA.

El programa COFECHA desarrollado por Holmes (1983) es una herramienta que permite identificar las porciones de series de anillos que puedan tener errores de fechado y/o medición, analiza los datos de cada muestra, los ordena, correlaciona y señala los errores de medición, además identifica las muestras que bajan la correlación que se pueden eliminar para corregir la medición. Para cada segmento, el programa buscó otro segmento que se correlaciona de manera eficiente con la serie maestra, buscando la mejor posición en la que se correlaciona cada segmento con alguno de la serie maestra, por lo cual el programa calcula la serie maestra como la media de todas las demás series.

Los datos de las series de anchuras de anillos de crecimiento ya verificados y fechados fueron posteriormente introducidos en el programa ARSTAN desarrollado por Cook en 1985. ARSTAN estandariza las mediciones de las muestras y construye la cronología del sitio. La estandarización es necesaria ya que genera índices adimensionales y permite remover las tendencias de crecimiento del árbol por la edad y la geometría del tronco, así como episodios de supresión y liberación del rodal. ARSTAN eliminó las tendencias biológicas propias del crecimiento y minimizó

las variaciones en el crecimiento que no son comunes en todos los árboles (Fritts, 1976). ARSTAN ajusta una función lineal, exponencial o spline, para posteriormente dividir el valor calculado por dicha función entre el observado (Fritts, 1976; Kairiuskstis, 1990).

En las series estandarizadas resultantes de amplitud de anillos, se pueden comparar la media y la varianza de la parte interna de cada serie con la parte externa. Una vez eliminada la varianza debida al crecimiento diferencial entre árboles jóvenes con crecimiento rápido y viejos con crecimiento lento, se promedian cada una de las series de las amplitudes en la cronología para cada año, de esta manera se produce la cronología maestra o estandarizada para el sitio (Swetnam, 1985; Fritts, 1976). Posteriormente ARSTAN ajusta un modelo autoregresivo "ARMA modeling" para eliminar la autocorrelación de las series de tiempo de las anchuras de anillos de crecimiento. La eliminación de la autocorrelación da como resultado a la cronología residual. Con el propósito de analizar la sensibilidad de respuesta de los árboles a lo largo del tiempo se utilizó ARSTAN para los intervalos de 1920-1940, 1940-1960, 1960-1980, 1980-2000.

Para analizar el efecto del clima sobre el crecimiento radial, se realizó un análisis de correlación entre la cronología de sitio generada y los datos climáticos de las 2 estaciones más cercanas al sitio de muestreo. En el análisis de correlación se utilizaron datos de precipitación y temperatura (máxima, mínima y promedio) de las estaciones Ajusco y Desviación al Pedregal (3.9 y 6 km de distancia promedio del sitio de muestreo). El periodo del análisis para precipitación fue de 1961 a 1988 y de temperatura de 1967 a 1988. Los valores ausentes en las series climáticas fueron calculados por el método de interpolación de proporción normal (Paulhus y Kohler, 1952).

Se obtuvieron las gráficas de correlación correspondientes de las relaciones entre el ancho de los anillos y la temperatura (mínima, media y máxima) y la precipitación.

6. RESULTADOS

6.1 Estructura diamétrica del bosque de *Pinus hartwegii*

El bosque de *Pinus hartwegii* tiene una estructura diamétrica muy semejante a la conocida como “J” invertida (Schultz, 1960 en: Pérez Jiménez y Sarukhan, 1970), donde el mayor número de individuos se concentra en las clases diamétricas inferiores en los diámetros menores de 30 cm, ya que prácticamente del 70 al 80% de los árboles se distribuyen en las categorías de 5 a 30 cm, y el valor modal más alto se presenta en la clase diamétrica de 8 a 20 cm (Fig. 6).

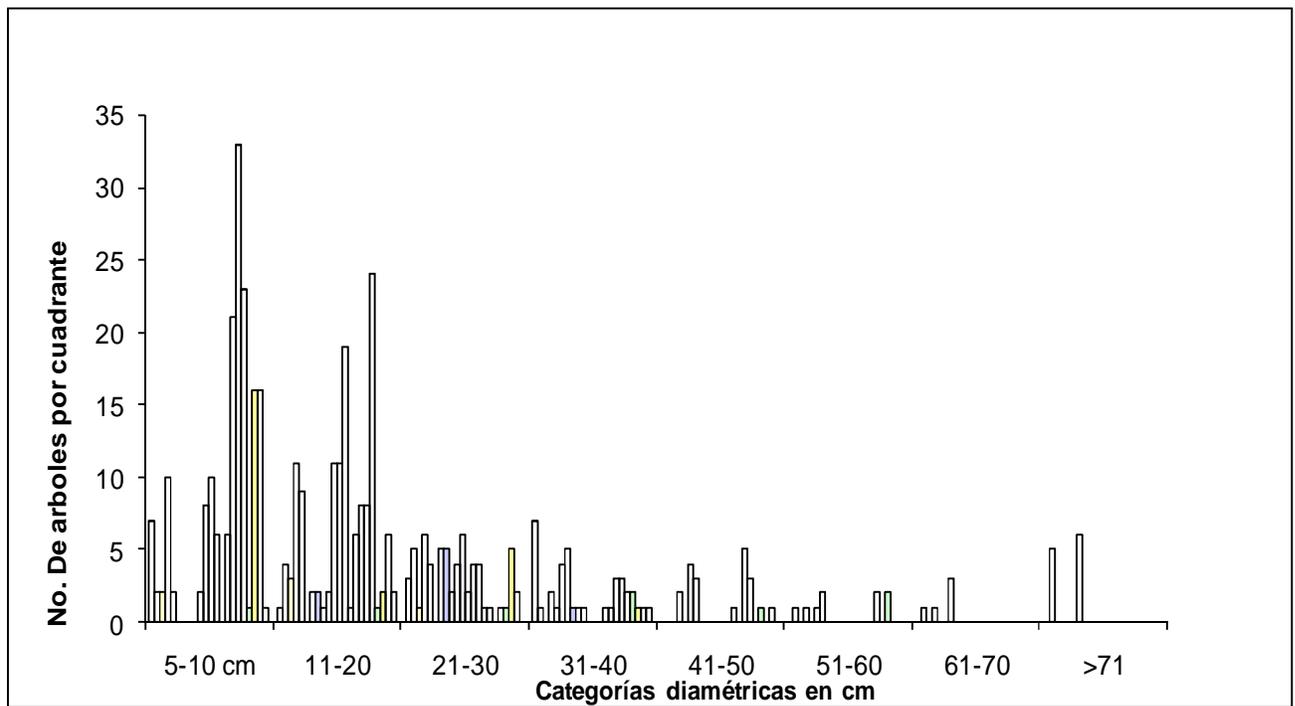


Figura 6. Distribución diamétrica del bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

6.2 Estructura diámetrica de las comunidades

En la comunidad *Muhlenbergia quadridentata*–*Pinus hartwegii* se encuentra el mayor número de individuos en las categorías diámetricas menores de 30 cm, siendo mayor el número de árboles en la categoría de 11 a 20 cm. No se encontraron árboles mayores a 50 cm en esta comunidad. El número total de árboles fue menor que en la comunidad *Festuca toluensis*–*Pinus hartwegii* (Fig. 7).

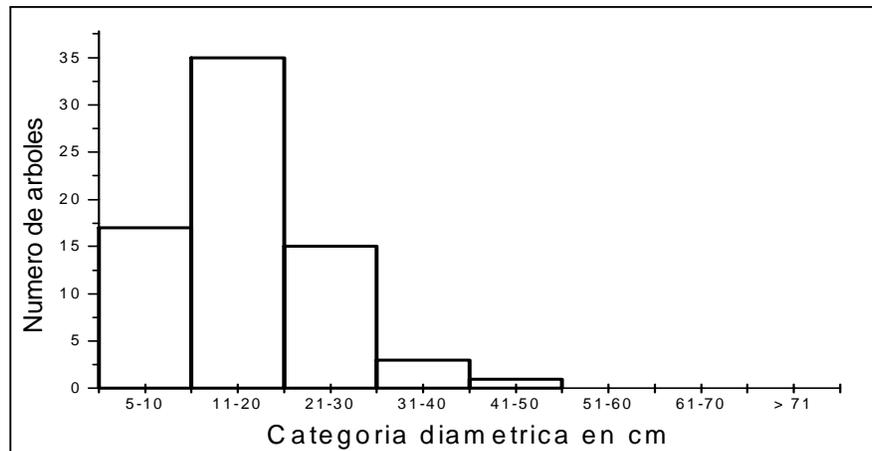


Figura 7. Número de árboles por categoría diámetrica para la comunidad *Muhlenbergia quadridentata*–*Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

En la comunidad *Festuca toluensis*–*Pinus hartwegii*, se observa la mayor cantidad de individuos en las categorías diámetricas menores, esto se debe probablemente a que el número de muestras fue mayor con respecto a la comunidad anterior (Fig. 8). Entre los 3,420 y 3,600 m snm, los árboles alcanzan diámetros de hasta 54 cm, pero llegando a los 3,800 m snm, los árboles llegan a 20 cm de diámetro como máximo.

Por otra parte, la presencia de árboles con diámetro mayor a 20 cm en las altitudes por arriba de los 3,600 m snm, puede sugerir estados de mayor madurez en el bosque, o posiblemente ser causa de mejores calidades del sitio considerando al diámetro como un atributo de crecimiento en relación con la productividad. En altitudes superiores este pino alcanza incrementos menores en su diámetro y su altura, aún cuando la calidad del sitio fue buena, posiblemente esto sea por efectos de la precipitación y la temperatura en estas altitudes.

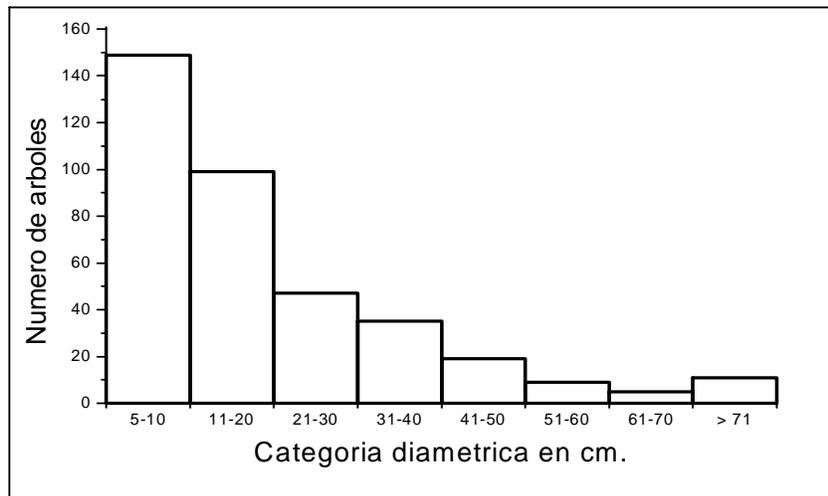


Figura 8. Número de árboles por categoría diamétrica para la comunidad *Festuca tolucensis-Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

6.3 Estructura vertical del bosque de *Pinus hartwegii*

La estructura vertical se definió en función de la altura del arbolado, desde la altura mínima hasta 24 m que fue el valor más alto registrado. La definición de los estratos se estableció en intervalos de altura de acuerdo a los cambios más notorios observados en el histograma ya que los árboles presentan una tendencia al agrupamiento. De esta manera se intentó hacer una estratificación más objetiva y apegada a la estratificación natural del bosque de *Pinus hartwegii*.

De acuerdo con este criterio de estratificación se definieron tres estratos arbóreos en los distintos cuadrantes (Fig. 9), el estrato I es menor a 8 m, el II (8-14 m), el III (mayor de 14 m) y alcanza los 24 m.

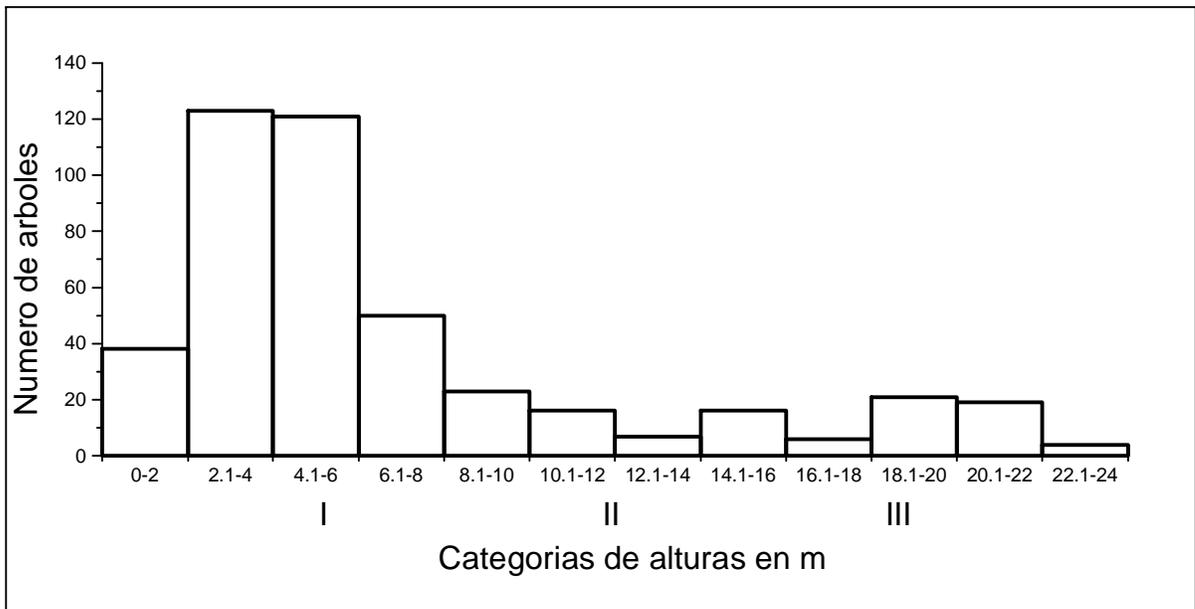


Figura 9. Comportamiento vertical de la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

El mayor número árboles se concentra en las clases de altura de 2 a 6 m, el mayor número de árboles contenido en el primer estrato y categorías de altura inferiores a 8 m coinciden también con el mayor número de árboles en las categorías diamétricas inferiores.

6.4 Análisis de correlación

Correlacionando las alturas con los diámetros obtenidos de los árboles en el bosque de *Pinus hartwegii*, se obtuvo la siguiente gráfica (Fig. 10), trazando una línea de tendencia polinomial se obtuvo la siguiente relación:

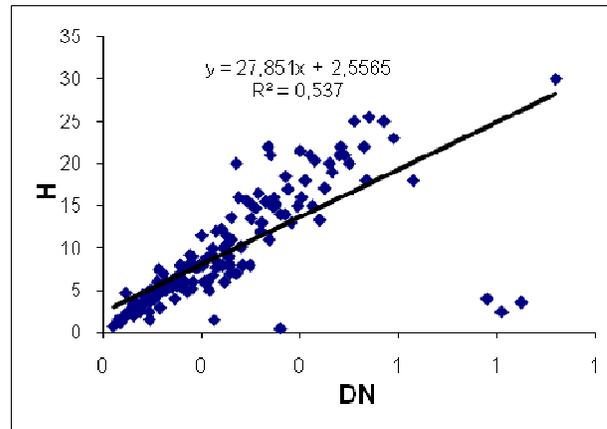


Figura 10. Correlación de diámetro contra altura en el bosque de *Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

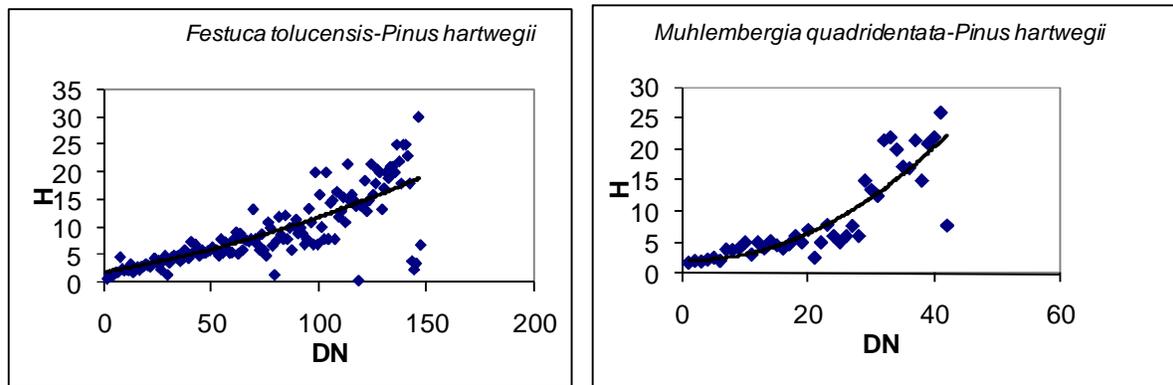


Figura 11. Correlación de altura contra diámetro normalizado en las dos comunidades de *Pinus hartwegii*.

Para la comunidad *Festuca tolucensis*–*Pinus hartwegii* la relación de la altura al diámetro normalizado es directa. Con una línea de tendencia polinomial, la relación calculada es:

$$Y = 0.0003 x^2 + 0.0669 x + 1.7503$$

$$R^2 = .63$$

Para la comunidad *Muhlenbergia quadridentata*–*Pinus hartwegii* los valores están más dispersos, con una línea de tendencia polinomial la relación es:

$$Y = -0.0005 x^3 + 0.0465 x^2 - 0.6241 x + 4.4311$$

$$R^2 = .76$$

En ambas comunidades se encontraron correlaciones mayores a 0.50 por lo que hay relación significativa entre las alturas y los diámetros.

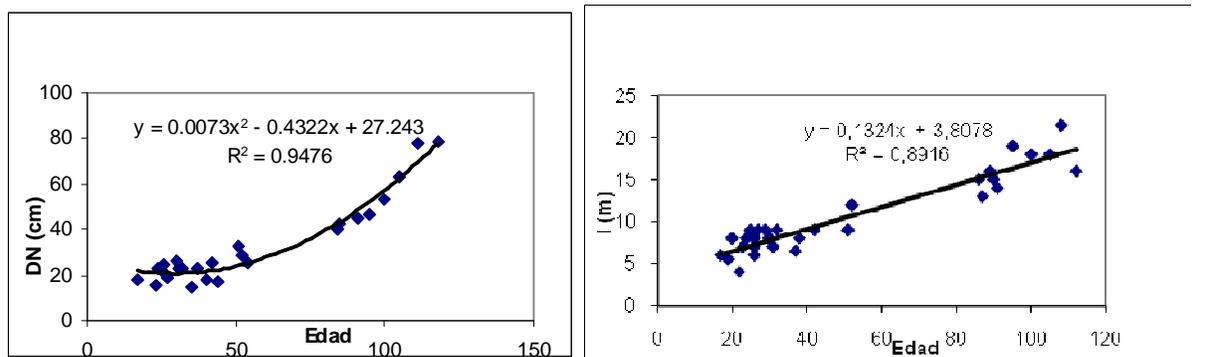


Figura 12. Correlación de edad contra diámetro y altura de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Al momento de contar los anillos de crecimiento se obtienen las edades de los árboles. Existe una correlación entre las edades de los árboles, los diámetros y las alturas en el bosque de *Pinus hartwegii* obtenidas después de trazar líneas con tendencia polinomial se obtuvo una $r^2 = 0.94$ para el diámetro y de .89 para las alturas, ambas relacionadas con la edad.

Se observa que hay una relación entre la edad de los árboles con su crecimiento en diámetro en altura. A mayor edad, el árbol reacciona con mayor crecimiento en diámetro y por consecuencia en altura. En las graficas (Fig. 12) es más evidente la relación alométrica con el DN en donde se observa que a mayor edad, mayor diámetro, mientras que en la gráfica de altura se tienen muchos

valores agregados en edades por debajo de los 50 años y por encima de los 80 años por lo que no se observa muy claramente la relación aun cuando la r^2 sea de .89.

6.5 Análisis de diámetros y alturas de los arboles a diferentes altitudes

Cuando se grafica la altura de los árboles contra las altitudes en las que se realizaron los muestreos (Fig. 13), se observa que en la altitud de 3,425 m snm, los árboles llegan solo a los 10 metros de altura, a medida que se incrementa la altitud las alturas se estabilizan por arriba de los 20 m, a los 3,715 m snm, hay una disminución muy marcada de las alturas de los árboles, donde no llegan a los 10 m, concordando con la descripción de Rzedowski (1983).

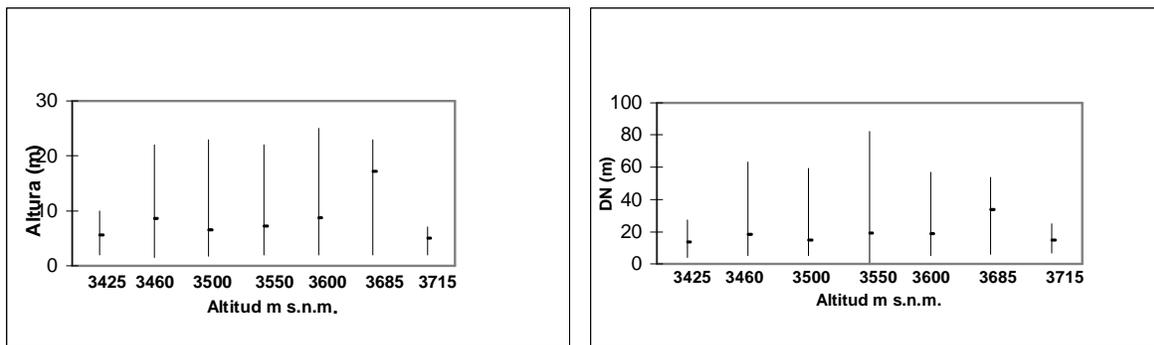


Figura 13. Alturas y diámetros con respecto a las diferentes altitudes en el bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Al observar la gráfica de diámetro contra las altitudes se observa también que en los límites altitudinales el intervalo de DN es muy corto, esto es, a los 3,425 m snm, los diámetros son pequeños mientras que a mayores altitudes, el promedio de diámetros es aproximadamente igual y no varía mucho excepto a los 3,550 m snm, en donde se tiene el mayor intervalo y donde los árboles crecen hasta 80 cm de diámetro, a los 3,715 m snm, la disminución es marcada ya que los árboles no llegan a 20 cm de diámetro, y el promedio está en 15 cm. Concordando con la gráfica de alturas en donde en la altitud superior los árboles son pequeños.

En la figura 14 se indica las edades de los árboles a las diferentes altitudes. Como se puede observar, las edades del bosque no son uniformes, hay intervalos muy pequeños y muy diferentes entre las altitudes. Donde el intervalo de edades es mayor es a los 3,570 y 3,575 m snm y si se comparan con las gráficas anteriores, es a los 3,500 m snm, donde se encuentran intervalos amplios en la altura y los diámetros, y es donde el bosque ha podido desarrollarse mejor.

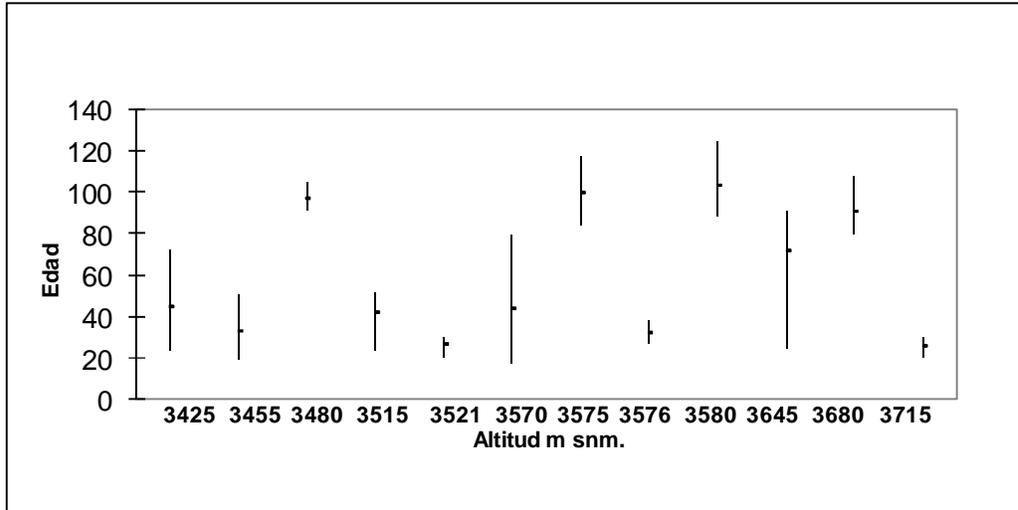


Figura 14. Comportamiento de las edades de los árboles de *Pinus hartwegii* con respecto a las diferentes altitudes en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

A los 3,425 m snm, se tiene un intervalo más amplio donde los árboles tienen de 20 a 70 años. La mayor distribución de edades se encuentra a los 3,570 y los 3,645 m snm. Al igual que en las gráficas anteriores, a los 3,715 m snm, es donde se observa que la disminución es muy marcada en el intervalo de edades donde la edad promedio es de 30 años.

6.6 Análisis dendrocronológico

Aún cuando el número de muestras fue superior a 80, no se encontró un patrón similar en la mayoría de las virutas inspeccionadas, Sólo se fecharon 12 muestras de 8 árboles, 4 de ellos con doble muestra, estos árboles mostraron un mismo patrón de crecimiento. Las muestras que no fueron fechadas no presentaron concordancia entre ellas en el patrón de crecimiento ya que no tenían muy bien definidos los anillos, y en numerosas ocasiones presentaron fragmentos de la muestra en la que los anillos estaban demasiado juntos haciendo difícil su observación.

El intervalo de tiempo en años de cada una de las muestras, en el caso de tener 2 muestras de un mismo árbol se maneja como muestra a y b (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de las muestras fechadas e introducidas posteriormente a ARSTAN.

Muestra	intervalo en tiempo	Años	Muestra	intervalo en tiempo	Años
Ph1 (a)	1883-2004	122	Ph7 (a)	1900-2004	104
Ph2 (b)	1882-2004	123	Ph8 (b)	1901-2004	103
Ph3 (a)	1913-2004	92	Ph9	1885-2004	119
Ph4 (b)	1908-2004	95	Ph10	1910-2004	94
Ph5 (a)	1920-2004	84	Ph11	1915-2004	89
Ph6 (b)	1919-2004	86	Ph12	1900-2004	105

Como se muestra en la tabla 2, COFECHA analizó 12 muestras, teniendo 123 años la muestra con mayor número de anillos (1882 - 2004). Se fecharon un total de 1250 anillos obteniéndose una correlación promedio de 0.670, generalmente es recomendable tener un valor de intercorrelación alto, con el cual se asegure que el fechado sea correcto, este mismo valor de correlación se obtuvo adicionalmente en el programa ARSTAN.

Tabla 2. Resultados arrojados por el programa COFECHA

Numero de muestras fechadas	12
Serie maestra 1882 – 2004	123 años
Total de anillos fechados	1250
Intercorrelación entre series	0.670

ARSTAN utilizó los mismos archivos de COFECHA para construir la cronología.

Tabla 3. Estadísticas básicas de la cronología producidas por el programa ARSTAN

Longitud total de la cronología	1882-2004
Intervalo común	1922-2002
Número de árboles	8
Número de muestras	12
Sensibilidad media	0.1880
Desviación estándar	0.1892
Correlación entre radios	0.4534
Autocorrelación de 1er orden	0.3243
Proporción señal-ruido	7.695
Variación del primer componente	47.32 %

En donde:

Número de árboles y muestras – se utilizaron las muestras de 8 árboles, cuatro de los cuales tuvieron 2 muestras, dando un total de 12 muestras que fueron las utilizadas para calcular la cronología.

Longitud de la cronología - Es el periodo de tiempo en años que contiene la cronología, ésta corrió de 1882 al 2004 dando un total de 122 años. Es recomendable que para una buena cronología se tengan mínimo 100 años.

Intervalo común – El intervalo común óptimo, que no siempre concuerda con la longitud de la cronología, es el periodo en el cual concuerdan las cronologías de la mayoría de árboles. En este caso la mayor cantidad de árboles tuvo como intervalo común de 1922 al 2002.

Sensibilidad media – Muestra el cambio que hubo en los valores sucesivos de una serie de anillos. Indica que tanto responden los árboles a factores ambientales. La sensibilidad media encontrada fue de 0.1880, siendo un valor bajo, considerando valores altos arriba de 0.30 y valores intermedios de 0.20 a 0.29 Grissino-Mayer (2001).

Desviación estándar – Indica la respuesta de los árboles a factores ambientales, por eso el valor es muy parecido, como indican series altamente variables, es deseable tener un valor alto. El valor de esta cronología fue de 0.1892, que se considera bajo.

Correlación entre radios – Llamada también correlación entre árboles, refleja la asociación entre 2 series de tiempo, como por ejemplo, las cronologías de diferentes árboles y su correlación entre una secuencia climática. El valor máximo es de 1, dando concordancia directa y -1 dando

concordancia inversa, si fueran independientes los datos, la correlación sería 0. En este caso la correlación fue de 0.45 lo que indica que si hay una correlación entre las series de tiempo, que aunque no es directa, muestra la asociación con una señal climática.

Autocorrelación de 1er orden – Además de medir la relación entre 2 series de tiempo, esta estadística también indica la relación entre 2 conjuntos de datos desplazados en el tiempo, esto es, el ancho del anillo puede ser relacionado con el año anterior o el siguiente, por lo cual muestra qué tanto está influenciado el crecimiento del árbol por el año anterior. La autocorrelación de primer orden fue de 0.3243, mostrando una baja autocorrelación, que señala que el crecimiento está influenciado por el año en curso, más que por el anterior.

Proporción señal ruido – Es la relación existente entre el factor “señal” que en una serie de anillos es la información de interés, y el “ruido” o la información irrelevante que perturba la expresión de la “señal” en una determinada cronología. Esto es, la varianza de los resultados anuales de una cronología, se debe a dos tipos de factores, los de gran escala que afectan al bosque en conjunto, y los factores a pequeña escala que afectan individualmente a los árboles o en determinados sitios, en este caso tenemos 88% de varianza común entre los árboles y dejando solo 12% de varianza como ruido, dando una proporción señal-ruido de 7.695.

A continuación se muestra la interpretación de acuerdo a la anterior información de los resultados obtenidos por ARSTAN.

Tabla 4. Interpretación de las estadísticas básicas proporcionadas por ARSTAN

Sensibilidad media	0.1880 (baja)
Desviación estándar	0.1892 (baja)
Correlación entre radios	0.4534 (alta)
Autocorrelación de 1er orden	0.3243 (baja)
Proporción señal-ruido	7.695 (media)

6.7 Cronología residual de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena

En la cronología se observan las variaciones en el índice de crecimiento adimensional, en una escala de 0.5 a 1.5, cada año (Fig. 15). La cronología presenta una alta variación interanual y una moderada variación decadal. Las depresiones en la variación con valores debajo de 1.0 indican que algún factor limitó el crecimiento de los árboles en ese año, y por el contrario valores superiores a 1.0 indican que los árboles tuvieron un crecimiento favorable. Los años puntuales en los que el factor fue muy evidente en la reducción en el ancho de los anillos fueron: 1888, 1890, 1900, 1925, 1964.

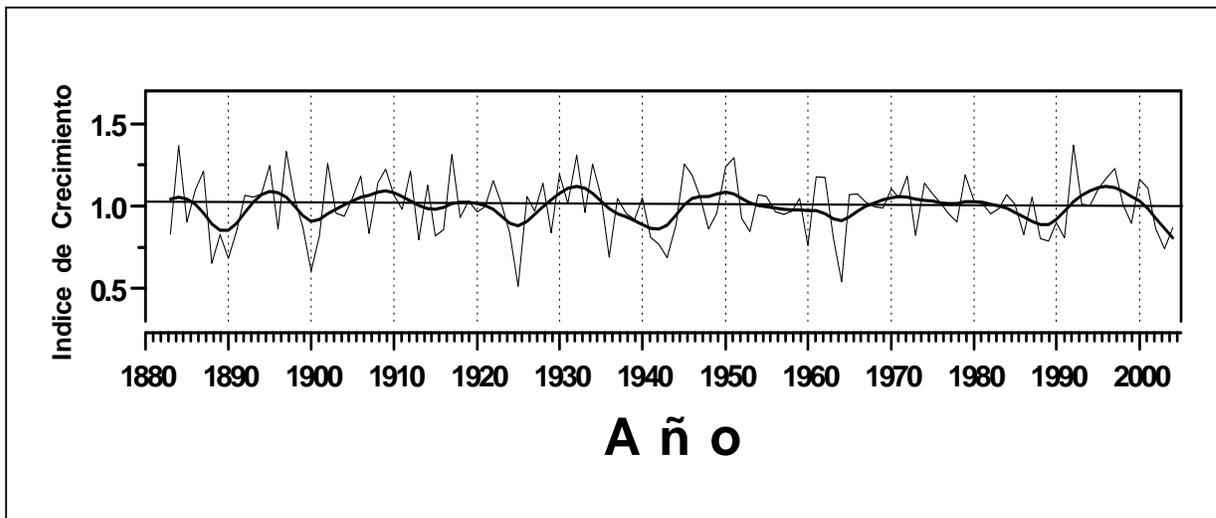


Figura 15. Cronología de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F. La línea suavizada del centro es un spline de 10 años, para acentuar la variación decadal.

Como se mencionó anteriormente, la sensibilidad media indica la respuesta de los árboles a un determinado factor ambiental, como el valor obtenido para toda la cronología fue bajo, de 0.1880 se corrió el programa ARSTAN una vez más pero ahora cada 20 años de acuerdo al periodo común (1920-2002) para observar si ha cambiado la sensibilidad media con respecto al tiempo (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de sensibilidad media cada 20 años con el programa ARSTAN

Periodo	Sensibilidad media
1920 – 1940	0.26
1940 – 1960	0.25
1960 – 1980	0.24
1980 – 2000	0.18

La tabla 5 muestra los valores de sensibilidad media para cada 20 años, siendo el valor más alto el que corresponde al primer periodo de tiempo (1920 a 1940), indicando que los árboles fueron más sensibles a un factor ambiental (clima). En los siguientes periodos la sensibilidad media fue disminuyendo a 0.25 para el periodo de 1940-1960, 0.24 para los años de 1960-1980, llegando a valores mínimos de 0.18 en el periodo más reciente. Lo anterior podría indicar que los árboles están siendo menos sensibles en periodos de tiempo más recientes. El mismo que se obtuvo al correr la cronología general (Fig.16).

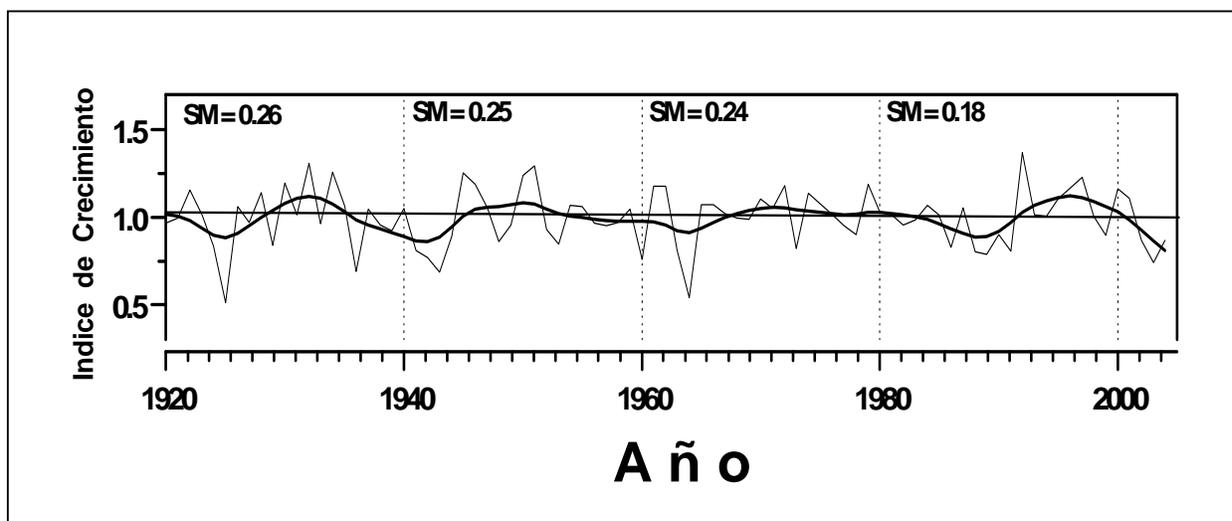


Figura 16. Cronología con sensibilidad media por periodos de 20 años.

6.8 Análisis de relación clima-crecimiento

La comparación entre anillos de crecimiento y variaciones climáticas es la que correlaciona las variaciones interanuales con el ancho de los anillos de crecimiento de una cronología con las fluctuaciones climáticas interanuales tomadas mes por mes. La relación estadística entre el ancho de anillo y la variable climática es examinada para el período común entre la cronología y los datos de temperatura y precipitación.

El análisis de correlación entre la cronología y la precipitación de la estación Ajusco (ubicada a 3.9 km del sitio de muestreo) (Fig.17) mostró una correlación positiva principalmente en el mes de octubre del año anterior de crecimiento y una correlación negativa en los meses de marzo y abril del año de crecimiento actual. En el año presente del crecimiento se observa la mayor correlación en el mes de abril, y una correlación negativa en noviembre del mismo año.

La correlación de la cronología con las temperaturas (mínima, media, máxima) se observa una correlación positiva de enero a junio del año anterior al crecimiento con correlaciones negativas después de este mes hasta noviembre, se registró otro valor de correlación positiva en diciembre del mismo año, para el año de crecimiento presente la correlación positiva se da en el mes de marzo, y el valor más alto de correlación positiva en el mes de diciembre, se encontraron correlaciones negativas en los meses de julio a septiembre (Fig.17).

La correlación con la precipitación de la estación Desviación al Pedregal (Fig. 18) indica que en el año anterior al crecimiento la mayor correlación fue en el mes de noviembre, con una baja correlación negativa en el mes de abril. El mayor índice de correlación se encuentra en el año presente de crecimiento en el mes de abril.

La mayor correlación positiva con las temperaturas se presenta en el mes de diciembre del año anterior al crecimiento, encontrando otra correlación en el mes de diciembre del año presente del crecimiento. Se realizó también una correlación con el promedio de las 2 estaciones (Fig. 19) dando como resultado, para la gráfica de precipitación, correlación de julio a noviembre del año anterior al crecimiento y en el mes de abril para el año presente de crecimiento. Para la grafica de correlación con las temperaturas se encontró correlación en los meses de enero a marzo del año anterior al crecimiento, alta correlación en el mes de diciembre del mismo año y la mayor correlación en el mes de diciembre del año presente del crecimiento.

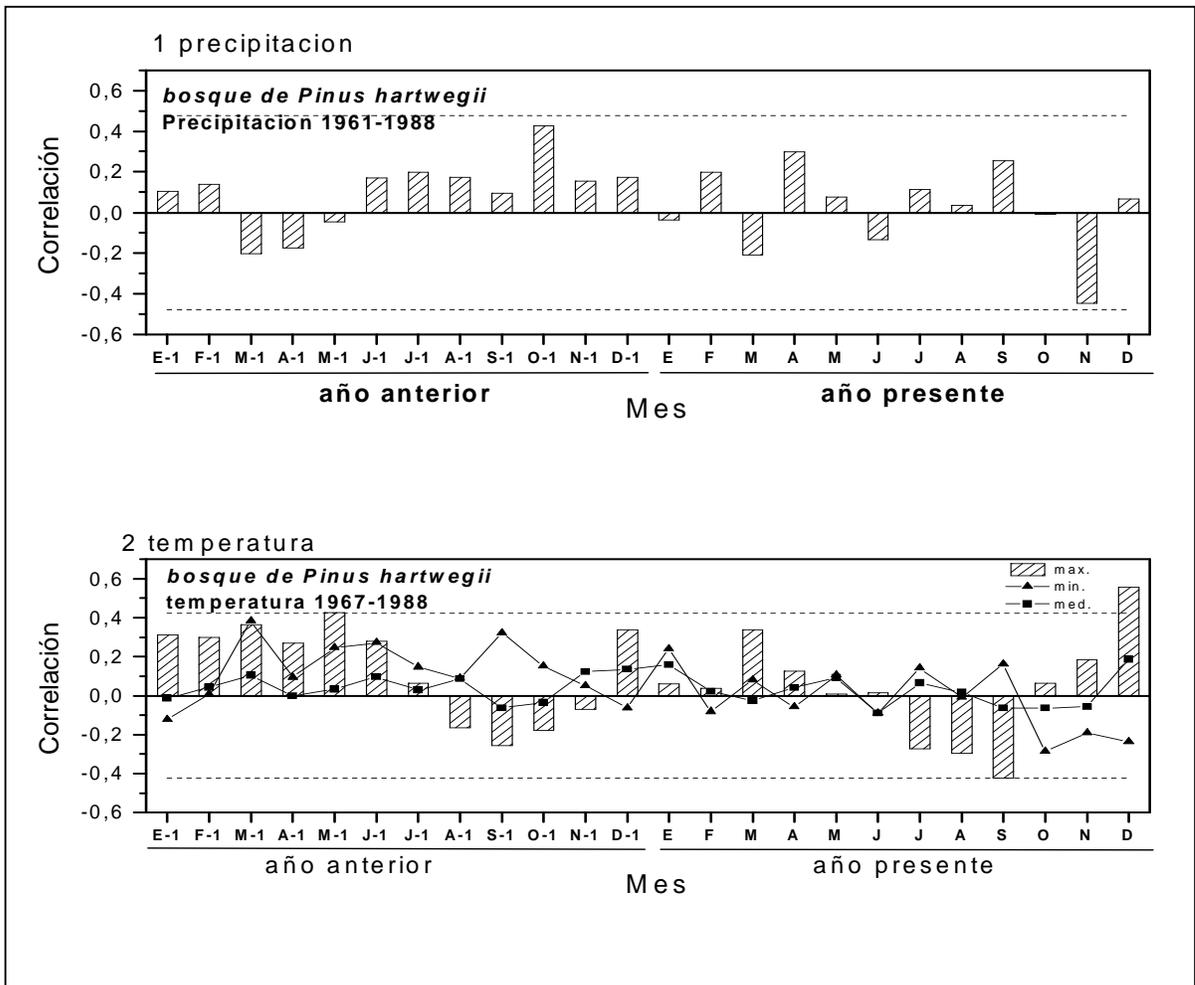


Figura 17. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para la estación Ajusco.

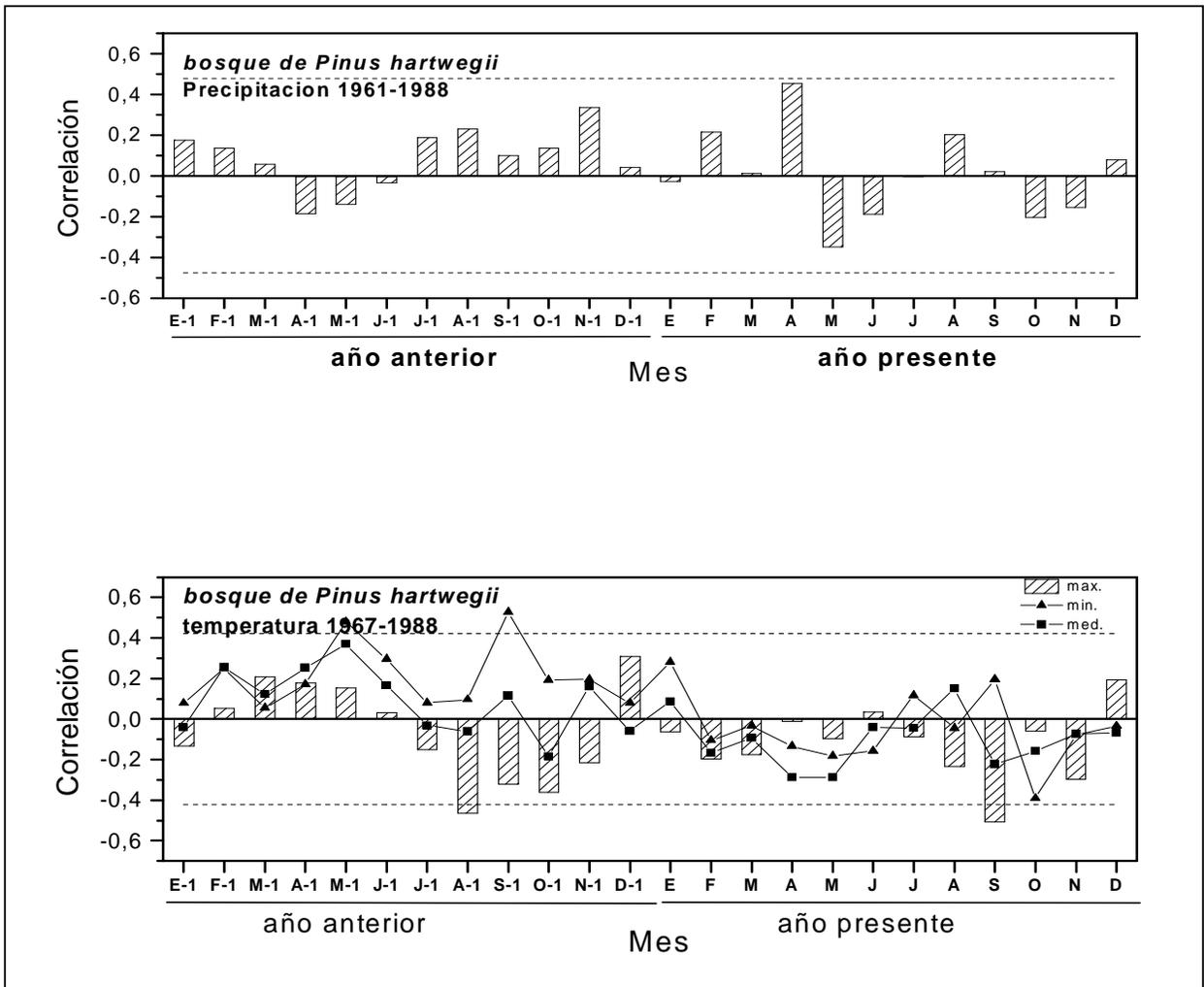


Figura 18. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para la estación Desviación al Pedregal.

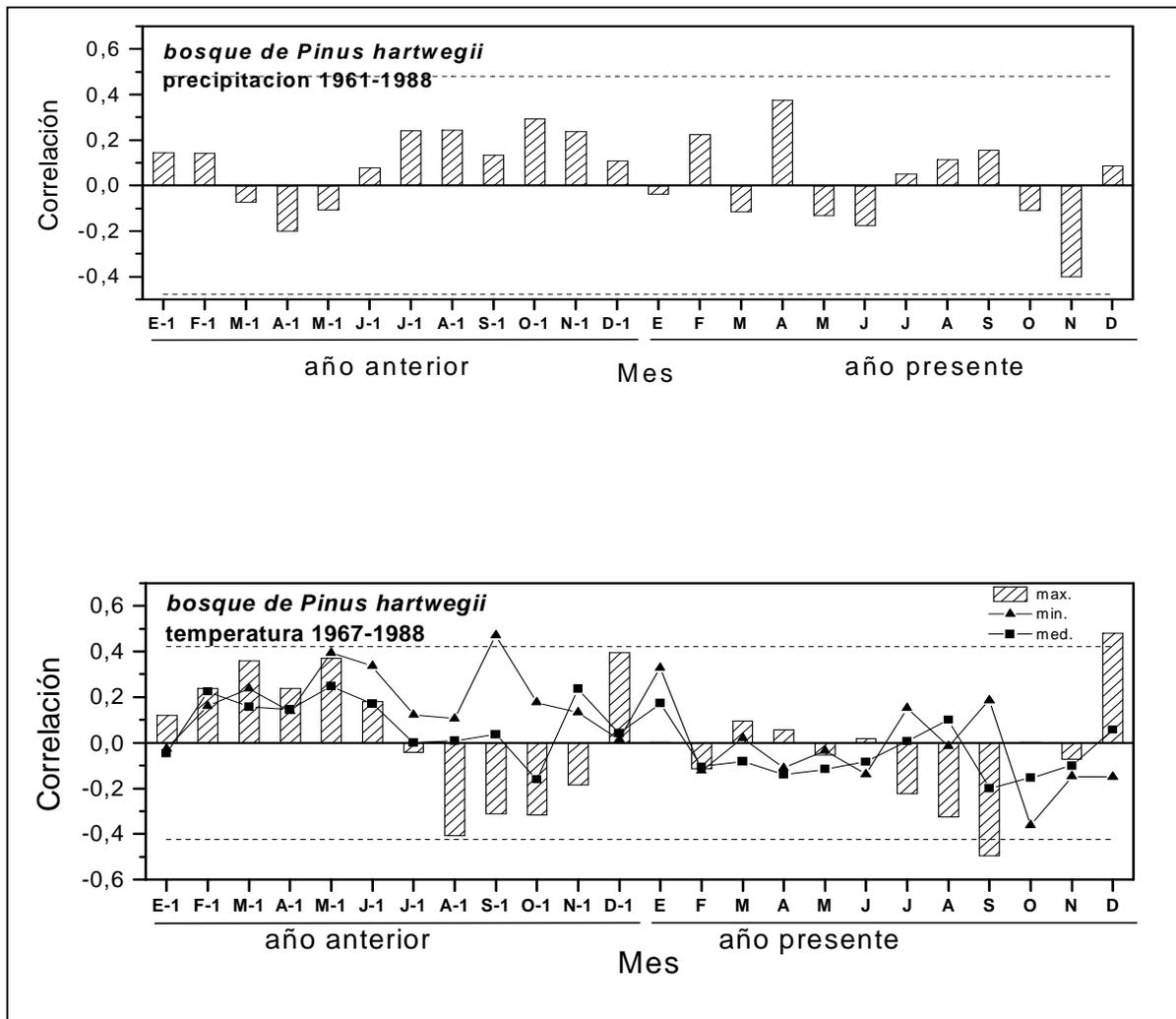


Figura 19. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para el promedio de las 2 estaciones.

DISCUSIÓN

En la CRM, el bosque de *Pinus hartweggi* es monoespecífico, ya que el 80% de individuos del estrato arbóreo pertenece a dicha especie.

El análisis de estructura diamétrica de este tipo de bosque, mostró que el mayor número de individuos se concentra en las categorías inferiores a 30 cm, lo cual coincide con una distribución de “j” invertida, y a su vez sugiere que el rodal se encuentra en etapas sucesionales secundarias en las que domina la presencia de individuos jóvenes con diámetros pequeños, lo que puede significar un alto grado de regeneración del bosque. Esta distribución diamétrica, puede ser el resultado de cierto grado de perturbación en la zona, porque como consecuencia de la misma se pueden presentar etapas sucesionales secundarias en donde es mayor la proporción de individuos jóvenes. Los análisis de correlación, indican que si bien, el árbol reacciona a un incremento mayor en diámetro mientras incrementa en altura, no existe una relación directa entre estas dos variables en altitudes mayores a los 3,600 m snm. En áreas con mayor altitud, el árbol aumenta en diámetro pero no lo hace en altura, coincidiendo con lo ya mencionado sobre la fisonomía de este tipo de bosque (Rzedowski, 1978).

La estructura diamétrica de las dos comunidades no tuvo una diferencia significativa, ya que ambas tienen la misma tendencia a agrupar la mayor cantidad de individuos en clases diamétricas inferiores.

Con respecto a las correlaciones edad/diámetro y edad/altura se observa, que el diámetro y la altura no están determinados en su totalidad por la edad del arbolado. La relación alométrica en donde más clara es la correlación, es la que muestra que a mayor edad mayor diámetro; mientras que en la relación entre diámetro y talla, se tienen muchos valores agregados en edades por debajo de los 50 años y por encima de los 80 años, por lo que no es muy clara la relación aún cuando la r^2 sea de 0.89. Esto coincide con Sarukhan (1974), que menciona que existe evidencia suficiente para afirmar que no hay una relación directa entre el diámetro y la edad real de los pinos, por tanto, no se debe considerar a las clases de edades como clases diamétricas.

Los árboles en una altitud inferior a los 3425 m snm alcanzan sólo los 10 m de altura, a medida que aumenta la altitud, las alturas se estabilizan por arriba de los 20 m y así se mantienen hasta que el bosque alcanza la mayor altitud muestreada (3715 m snm), donde los individuos alcanzan alturas no superiores a los 8 m. Algo similar sucede con la variación de DN con la altitud, en donde a los 3425 m snm, el diámetro de los árboles es pequeño mientras que a mayores altitudes el promedio de diámetros es relativamente constante y no varía mucho excepto a los 3550 m snm, en donde los árboles tienen diámetros de hasta 80 cm. A los 3715 m snm la disminución es marcada, ya que el promedio de diámetro no supera los 15 cm, lo que concuerda con lo que sucede con las alturas; por

tanto, a mayor altitud los árboles tienden a tener tallas y diámetros menores. El poco crecimiento en diámetro y altura en la altitud de 3715 m snm, concuerda con edades menores, pero el no encontrar edades superiores a los 30 años en altitudes superiores, no necesariamente indica que los árboles mueran antes, pero sí que sus alturas y diámetros no aumentan tan marcadamente por la altitud en la que se encuentran.

Lo encontrado en este estudio con respecto a las alturas y diámetros a diferentes altitudes, concuerdan con lo registrado por Villalpando (1968), quien menciona que para el Nevado de Toluca el tamaño de *Pinus hartwegii* disminuye con la altitud. También corroboran este hecho los resultados registrados por Jonson (1970) en el Pico de Orizaba y May Nah (1971) para el Iztaccihualt.

Tomando en cuenta que el área es de fácil acceso, la falta de uniformidad de la distribución de edades, y la consecuente falta de normalidad para diferentes altitudes, puede ser explicada por lo encontrado por López-Cortes et al. (1993) que indican que las pendientes no pronunciadas y de fácil acceso pueden estar jugando un importante papel al no favorecer a una distribución normal de edades. Se ha encontrado que la distribución diamétrica de poblaciones con una historia de regeneración continua se ajusta a una función exponencial (Hett & Loucks, 1976). Por el contrario, poblaciones con distribuciones diamétricas menos continuas o irregulares, que no se ajustan bien a las curvas de estas funciones, como las encontradas en este estudio, son el resultado de procesos de regeneración estrechamente vinculados con fenómenos de perturbación.

Para conocer qué clase de regeneración tiene el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca, es necesario un estudio más detallado, que esté basado en la descripción de la dinámica de población con otros métodos. Sin embargo tanto las características individuales del árbol como las propias de la especie y los factores antropogénicos afectan a la distribución espacial y temporal en los cambios de crecimiento, por lo que es necesario investigar un gran número de árboles para identificar los patrones de distribución poblacional.

Los anillos de crecimiento fueron correctamente datados al año de formación siguiendo los métodos dendrocronológicos tradicionales, aunque la determinación de los anillos de crecimiento es más difícil a medida que aumenta la edad de los individuos. El procedimiento de fechado fue particularmente difícil debido a que en muchas muestras no eran evidentes los anillos de crecimiento. Esto puede explicarse ya que para tener un buen fechado, es necesario tener una muestra bien tomada, montada y lijada de tal manera que se pueda ver al microscopio claramente la transición entre la madera temprana y la tardía delimitando bien en cada anillo. En este caso se desecharon muchas muestras por no cumplir estos parámetros, además de que al momento de fechar se encontraron muestras con muchos anillos falsos.

En los ejemplares fechados, los anillos fueron medidos con suficiente precisión, como para identificar anillos ausentes o falsos. Los estadísticos básicos proporcionados por ARSTAN indican que existe un alto porcentaje de señal común en las variaciones interanuales del crecimiento radial entre los individuos muestreados. La sensibilidad media encontrada fue de 0.18, el cual es un valor relativamente bajo. Este valor indicaría en primera instancia, que los árboles no están siendo totalmente sensibles a factores ambientales, especialmente el clima. Un posible factor por el cual la sensibilidad fue baja, podría ser el escaso número de muestras, ya que el valor de esta estadística se incrementa al tener un mayor número de muestras. Por otro lado, se sabe que las condiciones climáticas de un determinado año tienen efecto directo sobre las características del anillo de crecimiento formado durante ese año, pero que esas mismas condiciones climáticas podrían afectar el crecimiento en años posteriores a través de la formación de yemas, azúcares, hormonas, etc.

El análisis de componentes principales para construir la cronología, que incluyó las 12 series de los 8 árboles para el período común 1922 – 2002 (80 años), indica que la varianza común entre muestras, generada por el primer componente es de 47%. Así mismo la autocorrelación de primer orden fue baja (0.3243) indicando que el crecimiento está influenciado más por el año en curso, que por el año anterior. El 88% de varianza común obtenida entre árboles, indica que la mayoría de los individuos responde a una señal climática, y sólo el 12% de los mismos, no responde. Las cronologías para intervalos de 20 años, indican que la sensibilidad media ha disminuido desde 1920, año en que el valor de esta variable fue de 0.26, lo que significa que los árboles en esa época eran más sensibles al clima. Conforme se avanza en la cronología, la sensibilidad decrece (0.25, 0.24, 0.16) lo cual significa que aunque existe respuesta de los árboles al clima, el crecimiento está siendo afectado por otros factores.

La correlación entre los datos de temperatura y precipitación con las variaciones en el ancho de los anillos, tomando como base el promedio de las dos estaciones meteorológicas, tuvo una mayor validez estadística; con esto se logró que en el proceso de interpretación se eliminaran las inconsistencias encontradas en los datos de las estaciones por separado.

El análisis de correlación mostró que el crecimiento radial de *P. hartwegii* en los sitios de estudio, puede estar controlado por las condiciones climáticas de verano. Este crecimiento se relaciona significativamente con temperaturas y precipitaciones por encima de la media durante la primavera dando la correlación mayor en el mes de abril del año en curso (t1). No se observan correlaciones significativas con las condiciones climáticas de los meses previos a la estación de crecimiento. Lo anterior se logró, aún cuando los datos climáticos de esta región están incompletos y sabiendo que la actividad humana en la cuenca está afectando fuertemente el bosque.

Los resultados de temperatura y precipitación están correlacionados significativamente con el crecimiento radial. Sin embargo, la precipitación se relaciona aún más que la temperatura, lo que sugiere que el factor que controla el crecimiento puede ser el balance hídrico. Así, las temperaturas elevadas durante la estación de crecimiento y la alta disponibilidad de agua dada por la precipitación actuarían propiciando el crecimiento. Esto coincide con lo reportado por Bernal-Salazar (2001), quien menciona que la actividad cambial es muy alta en el transcurso del año porque inicia en la primera semana de febrero y cesa a mediados de enero. Con solo tres semanas de dormancia, presenta dos períodos con una tasa máxima de división, uno en abril y otro menor en septiembre, coincidiendo ambos con las correlaciones significativamente positivas tanto en abril como en septiembre del año en curso.

Además de los anillos falsos, en muchas muestras se observaron periodos de supresión a partir de la década de los setenta, ocasionando un conteo difícil, aún con la ayuda del microscopio. Estos periodos de supresión o disminución en la amplitud de los anillos fueron también reportados por Alarcón (1993) cuyos resultados en *Pinus hartwegii* en el Desierto de los Leones, muestran dos periodos de disminución en la amplitud de los anillos, el primero alrededor de 1930 y el segundo a partir de 1970. La primera reducción observada es consecuencia de bajos niveles de precipitación, en tanto que la segunda reducción a partir de 1970 es posiblemente debida a los altos niveles de contaminación registrados en las áreas de estudio, los cuales se han establecido en base a evidencias indirectas y sustentadas por mediciones directas de las concentraciones de ozono en los años 1990 y 1991 (Miller et al., 1992). Las observaciones de los periodos de supresión de las muestras coinciden con lo reportado anteriormente debido a la cercanía de los sitios de muestreo con el Desierto de los Leones. Los anillos anuales de los árboles proporcionan un registro a largo plazo de los componentes que influyen sobre el crecimiento y, por lo tanto, ofrecen la posibilidad de medir el impacto de los contaminantes sobre el crecimiento de los árboles, siempre y cuando el resto de las fuentes de variación puedan ser explicadas (Fox y Nash, 1980).

Las características del Valle de México acentúan la problemática de calidad del aire ya que se encuentra rodeado por macizos montañosos (Ceballos & Galindo, 1984; Huizar, 1998). Dentro de esta superficie existen numerosas elevaciones volcánicas que provocan de manera natural condiciones que no favorecen la dispersión de contaminantes. Además la altitud a la que se encuentra el área, ocasiona que los sistemas de combustión interna operen deficientemente emitiendo una mayor cantidad de contaminantes; aunado a la intensa y constante radiación que recibe durante el año que acelera la formación de ozono (S.M.A., 2000). La época de lluvias, entre mayo y octubre ocasiona un lavado de contaminantes y con ello un descenso de sus niveles. Esto explicaría la correlación positiva de diciembre en donde después de este descenso de contaminantes el árbol reacciona con un periodo de crecimiento.

Se ha comprobado que en los bosques del suroeste de la Cuenca de México los gases oxidantes son los responsables de los daños que afectan a varias especies de coníferas, algunas tan importantes como *Pinus hartwegii* en el área del Ajusco y Desierto de los Leones (Alvarado, 1989). Por la cercanía con la zona estudiada estos mismos daños podrían estar afectando a los árboles de *Pinus hartwegii* en la CRM. Otros trabajos que apoyan el posible efecto de los contaminantes en esta especie son los realizados en el Ajusco, cerca del sitio de muestreo, por Krupa & Bauer (1976) quienes describieron lesiones por oxidantes fotoquímicos en *Pinus hartwegii*. Estudios posteriores señalan al ozono como el factor principal de los daños observados en *Pinus hartwegii* (Hernández-Tejeda & Bauer, 1984; Jáuregui et al., 1990; Skelly et al., 1997).

Los resultados demuestran que si bien *Pinus hartwegii* tiene potencial para estudios dendrocronológicos en la cuenca alta del río Magdalena, es necesario primero un muestreo en nuevos sitios de la cuenca. Si se encuentra un patrón en la secuencia de anillos y estos pueden ser bien fechados se procederá a un muestreo más amplio que proveerá de un serie de cronologías sensibles a las variaciones de temperatura y precipitación, no descartando la sensibilidad a los contaminantes por la cercanía de la cuenca y la ciudad, y así proporcionar cronologías que serán útiles para efectuar una reconstrucción climática regional en la cuenca.

La importancia de este tipo de trabajo, es que a partir de ellos se puede hacer una red de cronologías de donde se obtengan, primero a nivel regional y después, cuando se incluyan otras especies, a nivel global, las reconstrucciones climáticas de lo acontecido durante la vida de los individuos en los bosques, y así poder evaluar el impacto en los diferentes tipos de bosques y hacer predicciones.

CONCLUSIONES

La mayor proporción de individuos con diámetros inferiores a los 30 cm, coincide con lo que se sabe de la fenología de esta especie de pino, el cual muestra incrementos menores de diámetro y altura en altitudes superiores, aun cuando la calidad del sitio sea buena

En altitudes bajas los árboles de *Pinus hartwegii* alcanzan entre 15 y 20 m, mientras que en sitios con mayor altitud, el bosque es bajo y los individuos alcanzan tallas de entre 5 y 8 m. Esta variación de distribuciones diamétricas y de tallas con el gradiente altitudinal, coincide con lo encontrado por Rzedowski (1978).

La cronología obtenida constituye una serie temporal que representa las variaciones anuales en el crecimiento radial de los árboles de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena.

Pinus hartwegii posee anillos de crecimiento anuales claramente demarcados. Las variaciones en el ancho de los anillos están controladas por los estímulos climáticos que ocurren durante la estación de crecimiento. Biondi (2001), analizando una cronología de 400 años procedente del Nevado de Colima, indica que la precipitación del verano debido al "Monzon" es la que más influye en el crecimiento de *Pinus hartwegii*, lo cual coincide con lo encontrado en este trabajo.

Los datos muestran que la sensibilidad media de la respuesta de los árboles al clima está dejando de ser el principal factor que influye en su crecimiento, tomando en cuenta que la zona de estudio está muy cerca de la ciudad de México, no se puede descartar la posibilidad de que la contaminación está siendo un factor que está influyendo más en el crecimiento de los árboles que las variables climáticas.

Otro punto que apoyaría la posible influencia de los contaminantes sobre los árboles, es la presencia misma de los anillos falsos, ya que se tiene documentado que estos aparecen en árboles de regiones templadas, durante períodos de estrés ambiental (Lorimer *et al.* 1999). Lo anterior se explica por el hecho de que se puede generar más de un anillo en un ciclo de crecimiento cuando las divisiones en la región cambial se detienen brevemente en respuesta al estrés. De igual manera, la duración del período de estrés afecta directamente el número de falsos anillos (Lorimer *et al.* 1999; Larson

1994). Esto podría ser la razón de que las muestras en las cuales no se pudo obtener un buen fechado se debió a la gran cantidad de anillos falsos.

LITERATURA CITADA

- Alarcón, M. A., Ma. L. I. De Bauer, J. Jasso, G. Segura, y E. M. Zepeda. 1993. Patrón de crecimiento radial en árboles de *Pinus hartwegii* afectados por contaminación atmosférica en el suroeste del Valle de México. *Agrociencia* 3: 76-80.
- Alvarado R., D. 1989. Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. Tesis de Maestría. Centro de Fitopatología. C.P., Montecillo Mex.
- Ávila Akerberg V. 2002. La Vegetación de la Cuenca Alta del Río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM. México 86 p.
- Bernal-Salazar, S. y Terrazas, T. 2001 Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*. 6 (1): 73-86.
- Biondi, F., 2001. A 400-year Tree-ring Chronology from the Tropical Treeline of North America. *Ambio* 30(3): 162 – 166.
- Boyas Delgado J.C. 1992. Determinación de la productividad, composición y estructura de las comunidades arbóreas en el estado de Morelos. Tesis de doctorado en biología UNAM FAC. Ciencias México DF.
- Carabias Ibarro, F. 1976 Mejoramiento ambiental y planeación de un parque en la Cañada de Contreras, México. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM México 127 pp.
- Ceballos, G y C. Galindo. 1984. Mamíferos silvestres de la Cuenca de México. Limusa (Ed) México, D. F. 300 pp.
- Cook, E.R. and L.A. Kairiukstis. 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Cuevas A. 1962. Estudio geográfico de la delegación Magdalena Contreras. Tesis de Maestría en geografía. Instituto de Geografía. UNAM, México 81 p.
- Daniel P.W.W.E. Helms and Baker 1982. *Principios de silvicultura* 2a Edición Mc Graw Hill Co. Inc USA 492 pp.
- Dobler Morales Carlos E. 2010. Caracterización del clima y su relación con la distribución de la vegetación en el suroeste del D.F. Mexico. Tesis de licenciatura. UNAM Mexico. 50 p.
- Duncan, R.P. 1993. Flood disturbance and the coexistence of species in a lowland podocarp forest, Westland, New Zealand. *Journal of Ecology* 81: 403-416.
- Eguiluz P. T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Bosques. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. México 571 p.

- Fritts, H. C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press Inc. London. 567 pp.
- Fritts, H.C. y Swetnam, T.W. 1989. Dendroecology: A Tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*. Vol. 19: 111-188.
- Fox, C.A., and T.H. Nash. 1990. The effect of air pollution on western larch as detected by tree-ring analysis. In: *Effects of air pollutants on Mediterranean and temperature Forest Ecosystems*, P.R. Miller., USDA For.Serv.Rep. PSW-43. P.35-50.
- Grissino-Mayer, H. D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57 (2) 205 – 221.
- García, E. (1978). *Los climas del valle de México*. Colegio de Postgraduados, S.A.R.H., Chapingo México, 63 p.
- Grijma P. 1982. *Producción forestal México Trillas*.
- González, R. 2001. Efecto del chamuscado de copa en el crecimiento en diámetro de *Pinus hartwegii* Lind. Tesis de Maestría en ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México 99 p.
- Harper, J.L. 1977. *Population biology of plants*. London: Academic Press, 1977. 582 p.
- Hentschel-Ariza, L. 1999. Programa de Manejo del Parque Nacional Nevado de Toluca. Toluca, México. 106 pp.
- Hernández-Tejeda, T. & L. I. De Bauer. 1984. Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. Lindleyi en el Ajusco, DF. *Agrociencia* 56(2):183-194.
- Hett, J. M.; Louks, O. L. 1976. Age Structure Models of Balsam Fir and Eastern Hemlock. *Journal of Ecology*. 64: 1029-1044.
- Huizar-A., R. 1998. Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída en la subcuenca de México. (Delegación Ixtapalapa) en Tomo I "Aire Agua". Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental (CONSERVA). Secretaria del Medio Ambiente. México, D. F.: 409-550 p.
- Jáuregui, E., L. I. De Bauer, A. Quevedo, P. R. Miller & F. Alvarado. 1990. Ozone characterization in a mountain forest near México City. Abstract First International Symposium on Urban Climate, Air Pollution and Planning in tropical cities. Guadalajara, Jalisco.
- Klepac, D. 1976. *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 365 p.
- Klepac, D. 1983. *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales*. Universidad Autónoma Chapingo, 2da Edición, Chapingo, México. 365 p.
- Kitzberger, T., Veblen, T. y Villalva, R. 2000. Métodos dendrocronológicos y sus aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. En:

ROIG, F. (Ed.). Dendrocronología en América Latina. Mendoza, Argentina. EDIUNC. pp. 17 – 78.

Krupa, S. V. & L. I. De Bauer. 1976. La ciudad daña los pinos del Ajusco. Panagfa 4(31):5-7.

Lara A & R Villalba (1994) Potencialidad de *Fitzroya cupressoides* para reconstrucciones climáticas durante el Holoceno en Chile y Argentina. Revista Chilena de Historia Natural 67: 443-451.

Lara A, R Villalba, JC Aravena, A Wolodarsky & E Neira (en prensa) Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* (alerce) para Chile y Argentina. En: Roig F (ed) Dendrocronología en América Latina: 217-247. Editorial Nacional de Cuyo, Argentina.

Lorimer, C.G., S.E. Dahir y M.T. Singer. 1999. Frequency of partial and missing rings in *Acer saccharum* in relation to canopy position and growth rate. Plant Ecology 143: 189-202.

Larson, P.R. 1994. The vascular cambium development and structure. Springer-Verlag, Berlin.

Morales M.S., Villalba R., Grau H., Villagra P., Boninsegna J., Ripalta A., Paolini L. 2000 Potencialidad de *Prosopis ferox* Griseb (Leguminosae, subfamilia: Mimosoideae) para estudios dendrocronológicos en desiertos subtropicales de alta montaña. Instituto de Silvicultura, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

Miller, P.R., M.L. de Bauer, A. Quevedo, y T. Hernandez. 1992. Comparision of ozone exposures characteristics in forested regions near Mexico City and Los Angeles. Air & Waste Management Association. 85th Annual Meeting & Exhibition, Kansas City, Missouri. June 21-26.

Morey, R. P. 1977. Como crecen los árboles. Cuadernos de biología. Omega Barcelona, España. 64 pp.

Nava López Mariana Z. 2003. los bosques de la cuenca alta del río Magdalena, D.F., México. Un estudio de vegetación y fitodiversidad. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. Mexico.

Ortega, S.J. 1952. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* Lind. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Agricultura. Departamento de Bosques. Chapingo, México. 76 p.

Paola Villegas D., Carlos Le Quesne & Chistopher H. Lusk (2001) Structure and dynamics of a population of *Gomortega Keule* (mol) baillon in old growth Valdivian rain forest in south-central Chile. Revista Chilena de Historia Natural v.74 n.4.

Perez-Jimenez, L. And Sarukhan, J. 1970. La vegetación de la región de Pichucalco, Chis. (The Vegetation of the Pichucalco Region, Chis.). Special Edition Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Mexico, 5:49-123.

Paulus, J.L.H. and M.A. Kohler, 1952: Interpolation of missing precipitation records. Mon. wea. Rev., Vol 80, Pags. 129-133.

Rincón, E. Y Huante, P. 1989. Dendrocronologia. Ciencia. 40:245-256.

- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México. 432 p.
- Rzedowski J. 1983. Principales comunidades vegetales. Flora Fanerogamica del Valle de México. Vol I CECSA. México, DF. 47-54 p.
- Rzedowski, J y GC de Rzedowski (eds). 2001. Flora Fanerogamica del valle de México. Vol I CECSA. México., DF. 47-54 p.
- Santillán P. J. 1991. Silvicultura de las coníferas de la región central. Tesis de Maestría en ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 305 p.
- Sarukhan K. J. Y M. Franco B. 1981. Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. SARH. Subsecretaría forestal y de fauna. Unidad de apoyo técnico, No.1 Serie Premio Nacional forestal.
- S. M. A. (Secretaría del Medio Ambiente). 2000. Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Departamento del Distrito Federal. México, D. F. 360 pp.
- S. M. A. (Secretaría del Medio Ambiente). 1998. Informe anual de la calidad del aire en el Valle de México 1997. Evaluación del sistema del desempeño ambiental en Aire. Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A). México, D. F. 40 pp.
- Skelly, J.M., J. E. Savage, L. I. De Bauer & D. Alvarado. 1997. Observations of ozone induced foliar injury on black cherry (*Prunus serotina*, var. *capuli*) within the Desierto de los Leones National Park, Mexico City. Environmental Pollution 95(2):155-158.
- Solís Pérez M. 1994. Monografía de *Pinus hartwegii* Lind. Tesis profesional Ingeniero forestal; Chapingo, México 30 pp.
- Spurr S.H. y Barnes B.V. 1982 Ecología Forestal. Trad. Carlos Rodríguez AGT Editor México 690 pp.
- Swetman TW, Thompson MA, Sutherland EK. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. US Dep Agric Agric Handb 639:1-39.
- Swetman TW, Thompson MA, Sutherland EK. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. US Dep Agric Agric Handb 639:1-39.
- Villanueva Diaz J. and G.R. McPherson. 1996. Reconstruction of precipitation and PDSI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico, USA and Sonora, Mexico. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Hydrology Section. Arizona Nevada Academy of Science 26: 45-54.
- Villanueva Diaz Jose, Dave W. Stahie, M.K. Cleaveland y M. D. Therrell. 2000. Estado Actual de la dendrocronología en México. Rev. Ciencia Forestal en México. Vol. 25 Num. 88 108 p.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Distribución de *Pinus hartwegii* en México. (Hentschel-Ariza, 1999). Cuadro 1. Tipos de bosques presentes en la cuenca del río Magdalena con sus asociaciones vegetales (Nava, 2003).

Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Magdalena en Mexico D.F.

Figura 3 a) taladro de Pressler marca Hangslof b) introducción del taladro en el tronco del árbol c) extracción de muestra d) colocación de muestras en popotes

Figura 4. Marcado de puntos de referencia para leer al microscopio

Figura 5. Esqueleto (skeleton-plot) representando el ancho de los anillos de las muestras.

Figura 6. Distribución diamétrica del bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 7. Número de árboles por categoría diamétrica para la comunidad *Muhlenbergia quadridentata–Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

Figura 8. Número de árboles por categoría diamétrica para la comunidad *Festuca toluensis–Pinus hartwegii*, en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

Figura 9. Comportamiento vertical de la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 10. Correlación de diámetro contra altura en el bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México D.F.

Figura 11. Correlación de altura contra diámetro normalizado en las dos comunidades de *Pinus hartwegii*.

Figura 12. Correlación de edad contra diámetro y altura de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 13. Alturas y diámetros con respecto a las diferentes altitudes en el bosque de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 14. Comportamiento de las edades de los árboles de *Pinus hartwegii* con respecto a las diferentes altitudes en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 15. Cronología de *Pinus hartwegii* en la cuenca del río Magdalena, México, D.F.

Figura 16. Cronología con sensibilidad media por periodos de 20 años.

Figura 17. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para la estación Ajusco.

Figura 18. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para la estación Desviación al Pedregal.

Figura 19. Gráficas de correlación con precipitación y temperatura para el promedio de las 2 estaciones

Tabla 1. Datos de las muestras introducidos al programa COFECHA.

Tabla 2. Resultados dados por COFECHA

Tabla 3. Estadísticas de la cronología producidas por el programa ARSTAN

Tabla 4. Interpretación de las estadísticas.

Tabla 5. Valores de sensibilidad media cada 20 años con el programa ARSTAN