

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Cambio Climático

La concentración de CO₂ atmosférico ha aumentado en alrededor de un 30% a partir de la revolución industrial (Bazzaz 1990). Se estima que este incremento de CO₂ en la atmósfera tiene un doble efecto sobre el planeta: efecto invernadero y fertilización de la vegetación. En el primer caso, junto con otros gases de invernadero, el CO₂ provoca calentamiento global de tal manera que las zonas climáticas del planeta podrían desplazarse hacia los polos y hacia mayores elevaciones alterando considerablemente la distribución de la vegetación (Overpeck 1991, Malcolm *et al.* 2002, Walther *et al.* 2002). El efecto fertilizante del CO₂ elevado, por otra parte, afecta de manera directa el crecimiento y la fisiología de algunas plantas, lo que a su vez puede alterar la estructura y el funcionamiento de las comunidades vegetales y de los ecosistemas (Bazzaz *et al.* 1996, Hughes 2000).

Estudios recientes revelan que el clima mundial ha sido particularmente inusual en el último siglo y que la década de los 90's fue la más caliente del último milenio (Briffa *et al.* 1995; Cook *et al.* 1991; Jacoby & D'Arrigo 1997; Mann *et al.*

1999; Jones *et al.* 2001). Además, en el último siglo se ha registrado un incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos (Sthale *et al.* 1998; Fedorov & Phylander 2000 y 2001). Se estima que la probabilidad de precipitaciones pluviales extremas por encima de la normal, seguirá incrementándose en algunas regiones del mundo durante los próximos 100 años (Milly *et al.* 2002; Palmer & Räisänen 2002). Numerosos estudios indican que el cambio climático que se registra en las últimas décadas está afectando de diversas maneras a los ecosistemas naturales (Hughes 2000, Walther *et al.* 2002; Parmesan & Yohe 2003; Root *et al.* 2003).

1.2 Crecimiento vegetal, Indicador de Cambio Climático

Uno de los bioindicadores principales que se ha utilizado para detectar posibles respuestas al cambio climático es el crecimiento, o aumento de biomasa vegetal (Spiecker 1999). El proceso de crecimiento se ve afectado por el aumento de CO₂ en la atmósfera de una manera directa por el efecto de fertilización, y de una manera indirecta por el efecto invernadero (Hughes 2000). Este último implica aumento de temperatura, que a su vez afecta procesos directamente relacionados con el crecimiento como las tasas fotosintéticas y el uso eficiente del agua. Una gran cantidad de artículos reportan aumento en la producción de algunos cultivos y en las tasas de crecimiento de las plantas bajo condiciones controladas como respuesta al aumento de la concentración de CO₂, por efecto de fertilización y por efecto invernadero (Bazzas *et al.* 1990 y 1993; Callaway *et*

al. 1994; Campagna *et al.* 1989; Feng *et al.* 1997; Ming & Zhan 1998; Telewski 1998). Los resultados de una exhaustiva revisión de 342 artículos en los que se refieren más de 1000 experimentos sobre los efectos del aumento de CO₂ atmosférico en el crecimiento y desarrollo de las plantas, revelan que en promedio se reportan aumentos en el crecimiento de 62% en especies arbóreas (Idso 1992 citado por Graybill & Idso 1993). En un análisis amplio de los resultados registrados en más de 500 reportes sobre los efectos de concentraciones elevadas de CO₂ en la acumulación y distribución de biomasa en los organismos, Curtis (1998) encontró que tanto la biomasa total como la asimilación neta de CO₂ incrementan significativamente en ambientes con el doble de la concentración de CO₂.

Después de los análisis amplios de Idso (1992) y de Curtis (1998), numerosos estudios siguen reportando aumentos en el crecimiento como respuesta a concentraciones elevadas de CO₂: Norby *et al.* 2001 en un estudio con *Liquidambar styraciflua* encontraron que aún los árboles adultos que ya han pasado la etapa de crecimiento exponencial retienen la capacidad de responder a concentraciones elevadas de CO₂; Wand *et al.* (1996) en un estudio bajo condiciones controladas con plántulas de dos especies encontraron que la biomasa de todas las partes vegetativas se incrementaba bajo condiciones de CO₂ elevado; Ceulemans *et al.* (2002) encontraron en un estudio bajo condiciones controladas con *Pinus sylvestris* de tres años, que bajo condiciones de CO₂ elevado, los anillos de crecimiento eran significativamente más anchos como resultado de un incremento en el ancho de la madera temprana. Telewski

(1998) al comparar el crecimiento de *Pinus taeda* bajo condiciones ambientales y en condiciones de CO₂ elevado también encontró anillos de crecimiento más anchos bajo condiciones de CO₂ elevado; Wang & Curtis (2001) en un estudio bajo condiciones controladas encontraron que bajo CO₂ elevado la biomasa total de los individuos masculinos de *Populus tremuloides* se incrementaba de 58 a 66 % y la de los femeninos de 22 a 70%.

1.3 Dendrocronología, Herramienta para el Estudio del Crecimiento a Largo Plazo

La mayoría de las investigaciones que hasta la fecha se han realizado sobre los posibles efectos del aumento de CO₂ y del cambio climático sobre el crecimiento de las plantas con frecuencia son de corto plazo, se han realizado con plántulas, y generalmente bajo condiciones controladas. Una herramienta de investigación alternativa que permite estudiar las tendencias en el crecimiento a largo plazo a través del tiempo, en plantas adultas, y en condiciones naturales es el estudio del crecimiento a través del análisis de los anillos de crecimiento anual de especies arbóreas. Estos representan enormes bancos de información de gran potencial para la construcción de modelos de predicción (Cook 1991).

Algunos estudios dendrocronológicos han reportado aumento en la tasa de crecimiento radial de los árboles durante las últimas décadas, lo cual coincide con las predicciones de fertilización por incremento de CO₂ (LaMarche *et al.*

1984; Kienast 1986; Graybill 1993; Jacobi 1997; D'Arrigo 1993; Graumlich 1991). El primero de estos autores planteó que los aumentos detectados en las tasas de crecimiento obedecen al efecto fertilizante del aumento de CO₂ en la atmósfera.

1.4 Dendroclimatología, Herramienta para el Estudio de la Variabilidad y Cambio en el Clima

Los estudios sobre cambio climático se enfrentan a la escasez generalizada de registros meteorológicos pues, incluso en los países desarrollados, los registros climáticos confiables no se remontan más de 100 años (Easterling *et al.* 1999). Existen "registros" climáticos naturales como capas de hielo, sedimentos marinos, polen y anillos de crecimiento en árboles. Estos últimos destacan por su mayor resolución temporal. Una de las aplicaciones más importantes de la relación que existe entre el crecimiento anual y algunos factores climáticos es la posibilidad de poder reconstruir dichos factores mediante modelos de regresión utilizando los escasos registros climáticos como variable dependiente y los índices de crecimiento como predictores. La reconstrucción de factores climáticos del pasado constituye una base para el estudio de la variabilidad del clima y para el discernimiento entre las variaciones naturales y los cambios en el clima relacionados con actividades humanas, así como para la predicción de cambio climático en el futuro (Fritts 1976).

1.5 Dendrocronología en México

La mayoría de los estudios dendroclimáticos se han realizado en altas latitudes en donde los cambios estacionales son muy marcados y se reflejan claramente en los anillos de crecimiento anual de los árboles.

Las primeras referencias sobre estudios dendrocronológicos en México son aisladas (Scott 1963 y 1966; Naylor 1971; Stokes *et al.* 1976; Rueda 1983). Sin embargo en la última década la dendrocronología se ha convertido en una importante herramienta para los estudios en ecología y climatología en México (Huante *et al.* 1991; Alvarado *et al.* 1993; Villanueva Díaz & McPherson 1995; Villanueva-Díaz 1998; Villanueva-Díaz *et al.* 2000; Díaz 1995; Díaz *et al.* 2001; Díaz *et al.* 2002; Stahle & Cleaveland 1993; Stahle *et al.* 1999; Biondi & Fessenden 1999; Biondi 2000 y 2001; Biondi *et al.* 2001; Therrell *et al.* 2002).

1.6 Decadencia de Poblaciones Arbóreas

Uno de los detonantes de los estudios relacionados con efectos del cambio climático, la decadencia y muerte de poblaciones arbóreas en latitudes templadas, también se ha detectado en latitudes subtropicales. En la Sierra Madre Occidental, en México, durante la última década se observan casos de poblaciones arbustivas y arbóreas en decadencia (González *et al.* 2001). Este fenómeno parecería estar relacionado, con los eventos climáticos extremos que

se han registrado en las últimas décadas (González *et al.* 2000). Estas observaciones concuerdan con las predicciones de Villers y Trejo (1997 y 1998) que estiman que los ecosistemas más susceptibles de reducir su área de distribución en México debido al calentamiento global son los bosques templados; pero parecen discrepar de la hipótesis sobre aumento de la productividad por el efecto fertilizante del CO₂.

1.7 Planteamiento de la Tesis

Se estima que tanto la concentración de CO₂ en la atmósfera, como la temperatura media mundial y la frecuencia de eventos climáticos extremos seguirán en aumento durante las próximas décadas. El grado en el que estos factores desencadenarán cambios en la producción primaria de los ecosistemas aún está en duda. Falta mucho por hacer en cuanto a estimar el efecto del cambio climático en los bosques. Aunque existen registros de crecimiento acelerado, también los hay de decadencia de poblaciones, por lo cual parece que el cambio en las concentraciones de CO₂ atmosférico podría comportarse como un agente de futuro crecimiento y a la vez promover decadencia de los bosques. Las implicaciones para la actividad forestal son muy importantes. Por lo tanto, el monitoreo de los cambios que están ocurriendo en la actualidad, posiblemente como respuesta al cambio climático, constituye un aspecto fundamental en la planeación y política forestales.

El efecto fertilizante de las crecientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera podría incrementar la productividad y las tasas de crecimiento de los bosques. Dicho efecto se ha registrado en innumerables estudios bajo condiciones controladas, generalmente con plántulas o con individuos juveniles (Idso 1992; Curtis 1998). Sería inadecuado inferir la respuesta de los árboles maduros en condiciones naturales a partir de los resultados de estudios con plántulas. Una herramienta más adecuada para evaluar el efecto del incremento en la concentración de CO₂ atmosférico sobre la vegetación natural puede ser el análisis de series de tiempo del crecimiento anual de los árboles (Graumlich 1991). Algunos estudios de campo han registrado aumentos en las tasas de crecimiento que podrían estar relacionados con el efecto fertilizante del CO₂ (La Marche 1984; Graybill & Idso 1993; Nicolussi *et al.* 1995, entre otros). Otros autores también han registrado aumentos que coinciden con la hipótesis del efecto fertilizante de CO₂, pero advierten que dichos aumentos no pueden considerarse como evidencia inequívoca de fertilización por CO₂ elevado (D'Arrigo *et al.* 1992; D'Arrigo & Jacoby 1993). También existen registros de incrementos en el ancho medio de los anillos a partir de finales del siglo XIX que se han relacionado con aumentos en las tasas fotosintéticas debidos a su vez al aumento de la temperatura registrada en algunas regiones del mundo, mas que con el efecto fertilizante del incremento de CO₂. Por ejemplo Szeicz (1997) encontró incrementos en el ancho de anillos de crecimiento de dos especies en Chile a partir de mediados del siglo XX lo que relaciona con incremento de temperatura de principios de verano; Arquillière *et al.* (1990) encontraron incrementos en el ancho medio de los anillos de *Larix* en Quebec a

partir de 1860 y citan al menos una decena de reportes previos que también encontraron incrementos en el crecimiento atribuidos al calentamiento global.

Según Graumlich (1990), si la hipótesis de aumento en las tasas de crecimiento por efecto de CO₂ elevado es correcta, las tendencias en crecimiento deben ser paralelas a las tendencias de aumento registradas en las concentraciones de CO₂ atmosférico durante el siglo XX; y consecuentemente deberán observarse dos fenómenos en las series de crecimiento anual: 1) los modelos estadísticos que predicen el crecimiento en función de la variabilidad climática contendrán un error sistemático con residuales positivos durante las últimas décadas; 2) las tasas de crecimiento durante el siglo XX serán más altas que las de la época preindustrial.

1.8 Objetivo General

El objetivo general en esta tesis es explorar posibles evidencias de cambio climático en el crecimiento de algunas de las especies arbóreas de la Sierra Madre Occidental mediante técnicas dendrocronológicas.

1.9 Organización de la Tesis

Esta tesis incluye siete capítulos, una sección con la bibliografía citada y tres apéndices. En el presente capítulo se aborda la introducción al tema, algunos antecedentes, el planteamiento, y el objetivo general de la investigación. En el capítulo dos se presenta una revisión general sobre el tema del cambio climático y sus efectos sobre la biosfera con la que se pretende proporcionar un panorama conciso sobre este tema y guiar al lector hacia las principales fuentes de información científica disponibles¹. Los capítulos 3 a 6 constituyen los reportes de investigación de los estudios realizados: Capítulo 3, Análisis dendroclimático de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el Estado de Durango; Capítulo 4, Análisis del crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental; Capítulo 5, Análisis del crecimiento anual de *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern., posible respuesta a cambio climático; y Capítulo 6, Análisis del crecimiento radial de *Pinus* spp. en el Sur de Durango. En el capítulo 7 se discuten los principales resultados de estos estudios y se enuncian las conclusiones generales de los mismos. En la sección sobre referencias bibliográficas se enlistan las fuentes de información citada en los capítulos previos. El apéndice A incluye los resúmenes estadísticos de las series de datos de crecimiento utilizados; en el apéndice B se incluyen las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* y de *Pinus lumholtzii* que se construyeron así como estadísticas descriptivas de las mismas; en el apéndice C se incluyen las matrices de correlación entre las cronologías de *Pseudotsuga*

¹ Este capítulo se publicó como parte del programa de doctorado en la revista CIENCIA UANL.

menziesii y los factores climáticos; las reconstrucciones de las variables climáticas mejor asociadas con los índices de crecimiento, y las tendencias observadas en los registros climáticos de algunas estaciones meteorológicas del área de estudio.

CAPÍTULO 2

CAMBIO CLIMÁTICO MUNDIAL, ORIGEN Y CONSECUENCIAS

2.1 Resumen

El cambio climático que se experimenta en la actualidad es un fenómeno provocado total o parcialmente por el aumento de gases de invernadero en la atmósfera, principalmente CO₂ emitido por actividades humanas. Una gran cantidad de estudios científicos indican que el cambio climático ya está teniendo efectos sobre la biosfera. Con este documento se pretende proporcionar, de manera concisa, un panorama general del tema y guiar al lector hacia las principales fuentes de información científica disponibles.

Palabras clave: cambio climático, calentamiento global, efecto de invernadero.

Abstract. Current climate change is due entirely or partially to the increase of greenhouse gasses in the atmosphere. Those from human based activities are the main culprit. Many scientific studies show that climate change is already having an impact on the biosphere. Here we attempt to provide a concise general overview on the subject and guide the reader to the main sources of scientific information available.

Key words: climate change, global warming, greenhouse effect.

2.2 Introducción

Calentamiento global y cambio climático, son conceptos estrechamente interrelacionados, en ocasiones confundidos o utilizados como sinónimos. Son fenómenos provocados total o parcialmente por el aumento de la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera, principalmente CO₂ relacionado directa o indirectamente con actividades humanas como el uso de combustibles fósiles, la fabricación de cemento, y la deforestación. Estudios científicos indican que el cambio climático ya está teniendo efectos sobre la biosfera (Hughes 2000; Parmesan & Yohe 2003; Root *et al.* 2003; Walther *et al.* 2002). Por su origen relacionado con actividades humanas y porque están afectando la vida en todo el planeta, estos problemas ambientales deben ser conocidos y entendidos, no únicamente por técnicos y científicos, sino por la población en general. Con este documento se pretende proporcionar, de manera concisa, un panorama general de tan grave problemática.

Este capítulo está dividido en cinco secciones que pueden leerse de manera independiente con el fin de facilitar la revisión ágil del mismo: I) Principios fundamentales, se comentan algunos hechos conocidos y aceptados por la comunidad científica internacional; II) Conceptos clave, constituye una breve explicación del significado de algunos conceptos relacionados con el tema; III)

Estado del conocimiento, se discuten brevemente las diferentes perspectivas desde las que se está abordando en la actualidad esta problemática; IV) Prioridades en Investigación, se sugieren líneas de investigación prioritarias en biología y ecología; y V) Lecturas recomendadas, pretende proporcionar al lector una guía sobre algunas fuentes de información que en conjunto constituyen una confiable y amplia panorámica de lo que se conoce en la actualidad sobre este tema.

2.3 Principios Fundamentales

Factores determinantes del clima global

El clima global de un planeta está determinado por su masa total, su distancia al sol y la composición de su atmósfera. De acuerdo a los dos primeros factores, se estima que la temperatura media de la Tierra sería de aproximadamente -18°C (Miller 1992). Sin embargo, la temperatura media de la tierra es 33°C más alta, es decir, alrededor de 15°C (Miller 1992; Harrington 1986). Esto gracias a la presencia en la atmósfera de pequeñas cantidades de vapor de agua (0 – 2 %), de CO_2 (0.03 a 0.04 %) así como de muy pequeñas cantidades de otros gases que absorben parte de las radiaciones térmicas de la superficie terrestre impidiendo que escapen hacia el espacio exterior, constituyendo así el efecto de invernadero natural de nuestro planeta (Bazzaz 1996). La variabilidad climática de la Tierra por otra parte, está determinada por tres factores: la

variación en la concentración de gases de invernadero, la actividad solar y la actividad volcánica (Mann *et al.* 1998).

La temperatura media mundial ha aumentado en el último siglo

La temperatura media mundial ha aumentado aproximadamente 0.6 °C durante los últimos 100 años y se estima que continuará aumentando rápidamente en las próximas décadas (Houghton *et al.* 2001). Estudios recientes revelan que el clima mundial del último siglo ha sido particularmente inusual (Mann *et al.* 1998 y 1999; Jacoby & D'Arrigo 1997; IPCC 2001; Jones *et al.* 2001). Mediante el análisis de anillos de crecimiento de pinos en Mongolia Jacoby *et al.* (1996) encontraron que los cambios de temperatura regional mostrados en los anillos de crecimiento eran notablemente similares a los cambios encontrados en otras regiones del mundo. Sus resultados muestran que a partir de fines del siglo XIX la temperatura mundial aumenta progresivamente de manera inusual con relación a los últimos 450 años. Mann, *et al.* (1998 y 1999), mediante la reconstrucción de la temperatura media mundial de los últimos 600 y 1000 años respectivamente, y mediante el análisis de las tendencias de las tres principales fuerzas que determinan la variabilidad del clima del planeta (actividad solar, actividad volcánica y concentración de gases de invernadero), encontraron que los tres factores han jugado un papel importante en la variabilidad climática mundial en los últimos siglos, pero que la concentración de gases de invernadero se convirtió en el factor principal durante el siglo XX. Encontraron también que la temperatura media anual en el hemisferio Norte durante cuatro años de la última década del siglo XX (1990, 1995, 1997 y 1998) alcanzó los

niveles más altos en el último milenio. Sus resultados también sugieren que el calentamiento global registrado en el siglo XX se contrapone a la tendencia general de enfriamiento del último milenio (Figura 2.1).

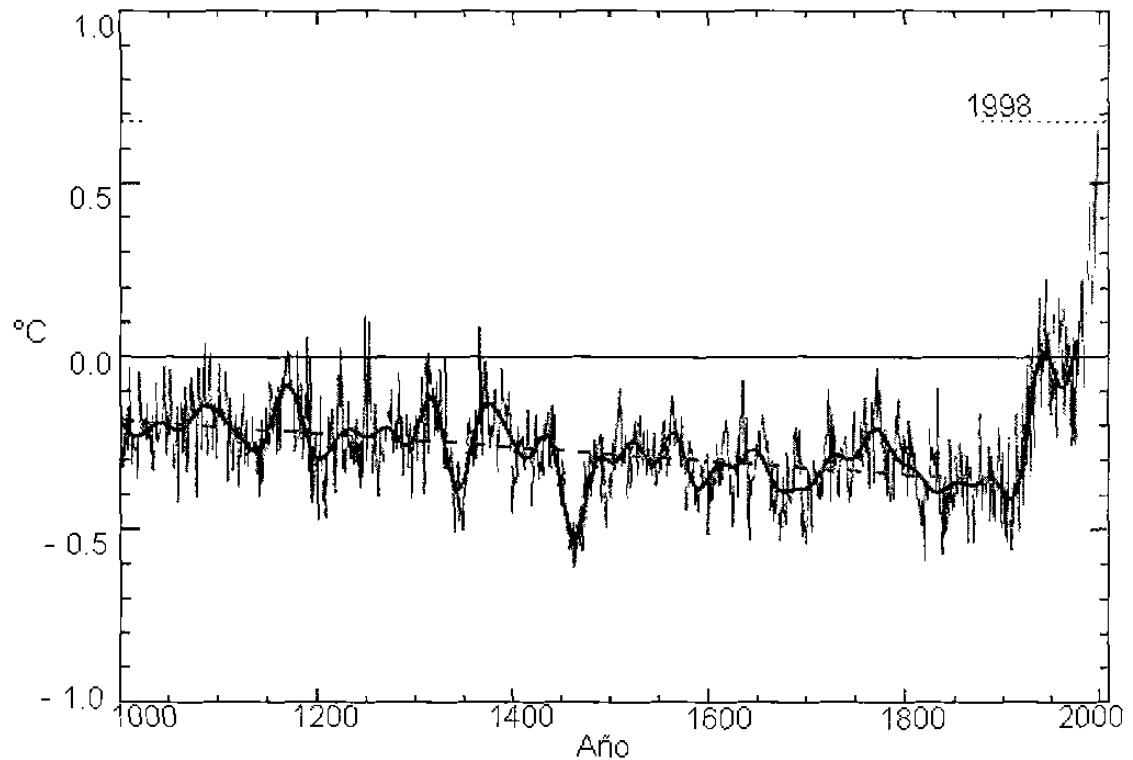


Figura 2.1 Reconstrucción de las anomalías en la temperatura media anual de la superficie terrestre en el Hemisferio Norte durante el último milenio (año 1000 a 1980); misma reconstrucción suavizada mediante una media móvil de 40 años; datos meteorológicos de 1902 a 1999; y tendencia lineal del año 1000 a 1900. Se aprecia claramente que la temperatura en el último siglo ha aumentado de manera inusual contraponiéndose a la tendencia a la baja que se observa hasta 1900. (Fuente: Adaptación de la figura de Mann *et al.* 1998 publicada en la página del IPCC).

El aumento de temperatura, o calentamiento global, desencadena otra serie de cambios

El calentamiento mundial registrado en el siglo XX se relaciona con una serie de cambios registrados en otros factores climáticos así como en el ciclo hidrológico y otros ciclos biogeoquímicos del planeta. Durante el último siglo ha habido disminución de la superficie terrestre cubierta por nieve o hielo, se ha reducido el tiempo en que algunos lagos y ríos permanecen congelados durante el año, se registró un aumento en el nivel medio del mar, ha habido cambios en los patrones de precipitación, velocidad de los vientos, nubosidad, y en la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos (IPCC 2001).

Fenómenos internos del sistema climático, como “El Niño” y su complemento “La Niña”, han aumentado su frecuencia e intensidad durante el siglo XX (Fedorov & Philander 2000; Jones *et al.* 2001).

La concentración de gases de invernadero ha ido aumentando desde la Revolución Industrial

La concentración de CO₂ atmosférico (principal gas de invernadero después del vapor de agua, y el más importante de los relacionados con actividades humanas) ha aumentado en alrededor de 15 % tan solo en las últimas cuatro décadas (Figura 2.2), y en un 30% en los últimos 150 años. De 280 ppm en la época preindustrial a más de 370 ppm en 2001 según los registros del Observatorio Mauna Loa en Hawai. Se estima que alcanzará entre 550 y 700 ppm para el año 2050 (Bazzaz 1990).

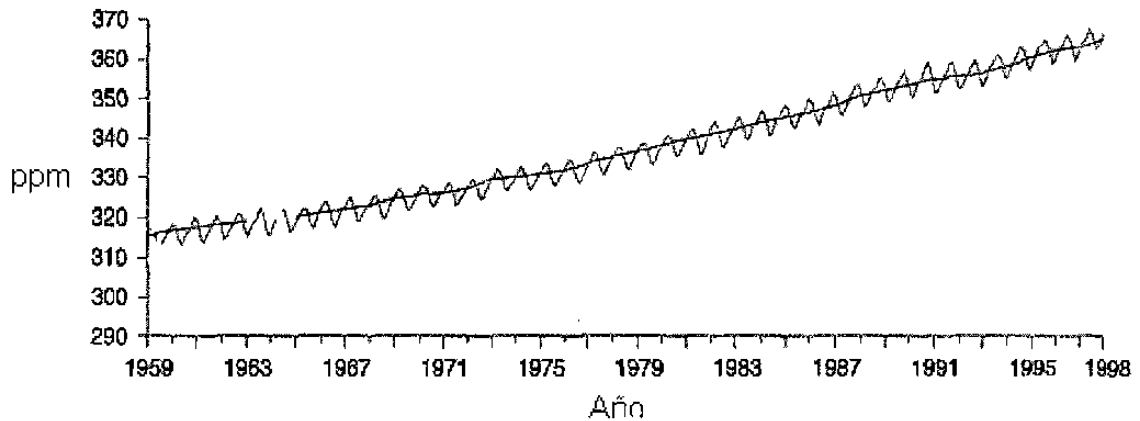


Figura 2.2 Concentración de CO₂ en la atmósfera desde 1958 registrada en el observatorio del Monte Mauna Loa en Hawaii. Los registros de este observatorio alejado de fuentes de contaminación muestran claramente que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en aproximadamente un 15% tan solo en cuatro décadas (de 316 ppm en 1958 a 369 ppm en 1998). La variación anual está relacionada con la mayor captación de CO₂ por las plantas durante la estación de crecimiento. (Fuente: Adaptada de una figura de la Universidad de California publicada en la página del IPCC).

El clima inusual en el siglo XX y el aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera están relacionados

Al comparar los datos de temperatura observados con los estimados mediante modelos por computadora, con y sin considerar los efectos por gases de invernadero, Wigley *et al.* (1998) demostraron que los modelos de predicción climática que consideran los efectos de gases de invernadero son realistas, y que ni la actividad solar ni la actividad volcánica pueden explicar la tendencia a calentamiento observada en las últimas décadas. Varios estudios (Jones *et al.* 1997; Labraga 1997) con modelos generales de circulación, indican que parece

existir una correlación entre el calentamiento global y el aumento de gases de invernadero en la atmósfera. Algunos autores (Miller 1992; Mann *et al.* 1999; Vitousek 1994) afirman que el aumento de CO₂ proveniente de las actividades humanas es la principal causa del cambio climático; otros (Barnett *et al.* 1999) consideran que la causa más probable es una combinación entre la variabilidad natural del clima y la que tiene su origen en actividades de *Homo sapiens*.

El cambio climático tiene efectos sobre los seres vivos

Recientes revisiones (Hughes 2000; Walther *et al.* 2002; Vitousek 1994) y meta-análisis (Parmesan & Yohe 2003; Root *et al.* 2003) de la gran cantidad de información científica disponible, indican que en la actualidad ya existen claras evidencias de que el cambio climático está teniendo efectos sobre especies animales y vegetales y sobre los ecosistemas. Los efectos del cambio climático sobre los seres vivos, según Hughes (2000) se pueden clasificar en cuatro categorías (Figura 2.3): 1) fisiológicos (fotosíntesis, respiración, crecimiento); 2) distribución geográfica (tendencia de algunas especies a desplazarse hacia mayores altitudes o hacia los polos); 3) fenológicos (alteración de ciclo de vida por efecto de fotoperíodo, horas frío, etc.); y 4) adaptación (cambios microevolutivos *in situ*). A esto habría que agregar que muchas especies, sobre todo aquéllas de distribución restringida, incrementarán su riesgo a la extinción y algunas de hecho, se extinguirán por efecto directo del cambio climático (Miller 1992; González *et al.* 2001; Huntley 1998).

2.4 Conceptos Clave

Calentamiento global. Aumento progresivo y gradual de la temperatura media de la superficie terrestre responsable de los cambios en los patrones climáticos mundiales. Aunque en el pasado geológico se ha presentado aumento de temperatura global como resultado de influencias naturales, el término *calentamiento global* se utiliza más frecuentemente para referirse al calentamiento de la superficie terrestre registrado desde principios del siglo XX y relacionado con el incremento en la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera.

Cambio climático. El clima nunca es estático, ya que presenta fluctuaciones cíclicas anuales y de mayor periodicidad así como variaciones ocasionales debidas a fenómenos naturales como la erupción de volcanes. Sin embargo, el uso más apropiado y convencional del término "cambio climático" es para referirse al cambio significativo que se está presentando en la actualidad y que no parece relacionarse con las variaciones cíclicas naturales. El cambio climático es provocado por el calentamiento global que, a su vez, tiene su origen total o parcial en el aumento de gases de invernadero en la atmósfera, incide sobre los patrones de temperatura y precipitación del planeta, así como en la frecuencia y severidad de eventos extremos como huracanes y sequías (Figura 2.3).

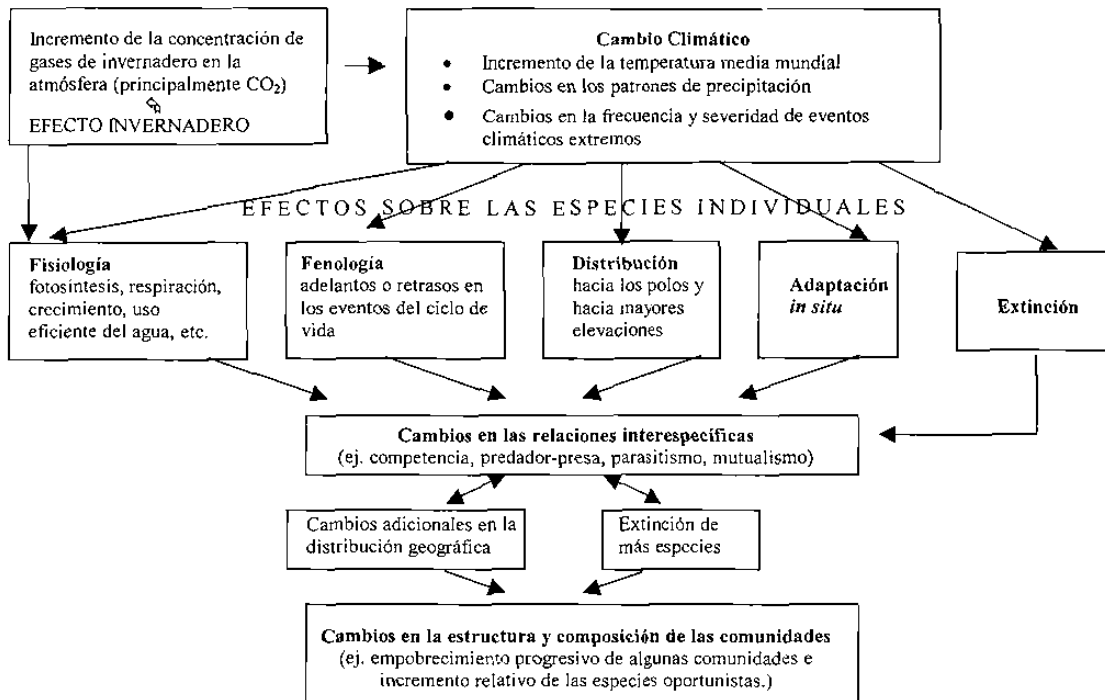


Figura 2.3 Vías potenciales del cambio en las comunidades y de la extinción de especies por efecto del incremento de gases de invernadero en la atmósfera. El aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera afecta algunos procesos fisiológicos de manera directa, y de manera indirecta a través de los efectos del cambio climático. La extinción de especies también puede presentarse como resultado directo del cambio climático o como consecuencia secundaria por los efectos del cambio climático sobre las relaciones inter-específicas. (Fuente: Adaptación de Hughes 2000).

Secuestro de CO₂. Procesos mediante los cuales se capta y se almacena mayor cantidad de CO₂ de la atmósfera de la que se libera hacia la misma. El tiempo de almacenaje en el que dicho carbono no vuelve a la atmósfera varía: durante la fotosíntesis las plantas absorben CO₂, liberan el oxígeno y almacenan el carbono en forma de biomasa hasta el momento de su

descomposición. Si en lugar de descomponerse, las plantas se convierten en combustibles fósiles, pueden continuar almacenando carbono durante siglos.

Resumideros de carbono. Depósitos en donde el carbono se capta de la atmósfera y se mantiene secuestrado por muy largo tiempo. Los grandes resumideros de carbono del planeta son los bosques (principalmente la biomasa de árboles de vida larga y la materia orgánica del suelo) y los océanos (formación y mantenimiento de plancton, así como carbono precipitado al fondo del mar). Los resumideros de carbono pueden servir para mitigar parcialmente las emisiones antropogénicas de gases de invernadero.

Gases de invernadero. Cualquier gas en la atmósfera que absorbe radiaciones infrarrojas: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), fluorocarbonos halogenados (HCFCs), ozono (O_3), hidrofluorocarbonos (HFCs), entre otros.

Efecto de invernadero. Proceso natural de calentamiento global en el cual algunos gases presentes en la atmósfera actúan como una capa que, de manera similar a los vidrios de un automóvil cerrado, es a la vez: 1) transparente a las radiaciones solares de onda corta permitiendo su entrada a la superficie terrestre, pero 2) opaca a las radiaciones térmicas de onda larga emanadas de la superficie terrestre evitando que estas escapen al espacio exterior. Gracias al efecto invernadero natural la superficie terrestre se calentó lo suficiente para permitir el origen y el mantenimiento de la vida en el planeta.

Sin embargo, de seguir aumentando la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera, la superficie terrestre sufrirá un calentamiento adicional cuyas consecuencias aún no se conocen con precisión.

El Niño-La Niña. Importante fenómeno interno del sistema climático mundial de frecuencia e intensidad variable cuyo principal detonante es el almacenamiento de calor en el Pacífico tropical. Durante El Niño el calor acumulado en el Pacífico tropical se distribuye hacia otras latitudes y hacia la atmósfera mediante corrientes marinas, vientos, precipitaciones intensas y evaporación llegando a provocar aumentos importantes en la temperatura media mundial durante los meses posteriores a cada evento. Durante su complemento, La Niña, cuando las intensas lluvias disminuyen, se empieza a “recargar” nuevamente de calor el Pacífico tropical. La mayor frecuencia de estos fenómenos, registrada en las últimas décadas, podría estar relacionada con el menor tiempo necesario para la “recarga” de calor en el Pacífico tropical debido al calentamiento global.

Modelos climáticos. Representaciones matemáticas de las interacciones de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y los glaciares que simulan el clima real o potencial.

2.5 Estado del Conocimiento

Aunque para la mayor parte de la comunidad científica el cambio climático global en el último siglo es una realidad indiscutible, aún no existe consenso con respecto a los agentes que lo originan. Hay quienes consideran que estamos ante un evento natural, que es parte de un ciclo y que durará unas dos décadas más. Para la mayoría, sin embargo, el cambio climático tiene su origen total o parcial en las actividades humanas, particularmente en las emisiones de carbono a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles y por la deforestación. Si no existe consenso en cuanto a las causas que originan el cambio climático, mucho menos lo hay acerca de los efectos que éste puede tener sobre la vida en el planeta.

Perspectiva política

El cambio climático global es un fenómeno que afecta al planeta entero de manera aún muy poco conocida, por ello se está abordando desde la perspectiva política como un problema internacional. En 1988 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial¹ establecieron en conjunto el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés². Los propósitos con los que se creó el IPCC son: evaluar el estado del conocimiento científico sobre diversos aspectos del cambio climático; evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos; y

¹ United Nations Environment Programme (UNEP) y World Meteorological Organization (WMO).

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

analizar estrategias de mitigación. El IPCC se reconoce internacionalmente como la autoridad científica y técnica sobre cambio climático, y sus evaluaciones tienen gran influencia en las negociaciones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático³ y su protocolo de Kyoto.

Perspectiva científica

Desde la perspectiva científica, por otro lado, existen una enorme cantidad de esfuerzos para el estudio del cambio climático, su origen y sus impactos actuales y potenciales. En 1986 se estableció el programa internacional de investigación científica Geosfera-Biosfera (IGBP, por sus siglas en inglés), uno de cuyos proyectos centrales es el Global Change and Terrestrial Ecosystem (GCTE) cuyos objetivos científicos son predecir los efectos de los cambios en el clima, la atmósfera y el cambio de uso de suelo en los ecosistemas terrestres, y determinar cómo estos efectos intervienen en la retroalimentación entre la atmósfera y el clima. En 1992, 16 países de América firmaron un Acuerdo Internacional para establecer el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático⁴ con la misión de desarrollar la capacidad de entender el impacto del cambio global presente y futuro en los ambientes regionales y continentales de América, así como promover la colaboración científica y

³ United Nations Framework Convention on Climate Change. Fundación de esfuerzos internacionales para el combate del calentamiento global, firmada durante la Convención Mundial en Río de Janeiro en 1992. Su principal objetivo es la "estabilización de la concentración de gases de invernadero en la atmósfera en niveles en los que no se provoquen más interferencias peligrosas de origen antrópico sobre el clima del planeta. La autoridad suprema de la Convención es la Conferencia de las Partes (COP), comprende 180 países que han ratificado o aceptado el tratado.

⁴ IAI. *Inter-American Institute for Global Change Research*.

proveer de información útil y de manera oportuna a los tomadores de decisiones.

Líneas de investigación actuales

La investigación científica relacionada con el tema se puede clasificar en dos categorías principales: 1) la de las ciencias físicas como la climatología y la meteorología; y 2) la de las ciencias biológicas como la ecología, la fisiología, la biogeografía, etc. En el caso de las ciencias físicas se publican una gran cantidad de artículos en revistas científicas como *Journal of Climate*, *Climate Dynamics*, *Bulletin of the American Meteorological Society* y *Geophysical Research Letters*, entre otras. Los climatólogos se enfrentan a dos retos principales: distinguir el cambio climático provocado por actividades humanas de la variabilidad climática cíclica de origen natural; y predecir los probables escenarios climáticos del futuro mediante el uso de modelos generales de circulación. Por otra parte, en revistas como *Nature*, *Science*, *Oecología*, *Journal of Biogeography*, *Ecological Applications*, *Plant Physiology*, *Trends in Ecology and Evolution*, *Journal of Ecology*, entre otras, se publican artículos relacionados con los impactos actuales y potenciales del cambio climático sobre los ecosistemas y sobre especies en particular.

En las ciencias biológicas se pueden distinguir tres principales líneas de investigación relacionadas con este tema: a) estudios sobre captura de carbono, b) desarrollo de modelos de predicción de los posibles impactos del cambio climático sobre la distribución y abundancia de las especies animales y

vegetales así como de las comunidades y los ecosistemas, y c) estudio de la respuesta de los organismos al cambio climático. En México existen muy pocos estudios sobre las dos primeras: captura de carbono y modelos de predicción; la tercera, respuesta de los organismos, está aún menos explorada. Esto contrasta con la enorme cantidad de artículos científicos publicados sobre el tema a nivel internacional principalmente durante los últimos 15 años.

Consecuencias biológicas

Desde hace poco más de 15 años empezaron a publicarse abundantes estudios sobre las posibles respuestas de los ecosistemas al cambio climático. Emanuel *et al.* (1985) y Peters & Darling (1985) fueron de los primeros en abordar el tema e indicar que el cambio climático podría originar la extinción de muchas especies y grandes cambios en la distribución geográfica de los biomas. Overpeck (1991) mediante modelos de simulación climática considerando escenarios con el doble de la concentración actual de CO₂, estima que el cambio en la distribución de la vegetación durante los próximos 200 a 500 años podría ser mas grande que el cambio ocurrido durante los últimos 7000 a 10000 años y que el rango de distribución de algunas plantas podría cambiar hasta por 500 a 1000 km, con efectos dramáticos sobre los ecosistemas silvícolas y los naturales. Debe recordarse que los efectos de cambio climático se suman a los impactos que sobre la biosfera ha tenido nuestra especie, entre los que destacan deterioro de hábitat y sobreexplotación de algunas especies (Jurado *et al.* 1998; Vitousek 1994). Otros autores han señalado que entre los cambios más notables estarán la reducción en el planeta entero de las áreas boscosas,

la expansión de los bosques tropicales en los trópicos y subtrópicos, y la pérdida de los bosques boreales (Solomon 1986). Para México, los modelos de predicción de Villers y Trejo (1997; 1998) estiman que los ecosistemas más susceptibles de reducir su área de distribución debido al calentamiento global son los bosques templados. Observaciones de campo en la Sierra Madre Occidental parecen indicar que efectivamente, algunas especies arbóreas están reduciendo su área de distribución como respuesta a sequías, las cuales acaban directamente con poblaciones periféricas o las llevan a un estado de estrés que las hace más susceptibles a los ataques masivos por plagas y enfermedades (González *et al.* 2001).

Las respuestas de los organismos y de los ecosistemas al cambio climático son tan variadas y complejas como los ecosistemas mismos. Cada especie responde de manera particular y sus repuestas afectan a su vez al resto de los componentes del ecosistema (Bazzaz 1996; Hobbie *et al.* 1999). La gran mayoría de los estudios sobre respuesta de los organismos al cambio climático se ha realizado de manera experimental bajo condiciones controladas y para evaluar la respuesta de especies individuales a factores climáticos o atmosféricos determinados (Harrington *et al.* 1999). Considerando dichos estudios en conjunto, se han encontrado tendencias que concuerdan con algunas de las predicciones teóricas acerca de la respuesta de la biota al cambio climático. Revisiones (Hughes 2000; Walther *et al.* 2002) y análisis amplios (Parmesan & Yohe 2003; Root *et al.* 2003) de los resultados registrados en numerosos estudios experimentales y observacionales

particulares, han permitido el acopio y análisis de series de datos de largo plazo, de áreas geográficas diversas y que incluyen grandes cantidades de especies animales y vegetales. Mediante este tipo de análisis Parmesan & Yohe (2003) y Root *et al.* (2003) llegaron a conclusiones similares: existe un desplazamiento de especies hacia mayores altitudes y hacia los polos; y algunos eventos de primavera de los ciclos de vida de diversas especies, en las últimas décadas se están presentando más temprano. De las especies que están experimentando cambios en su distribución geográfica, la mayoría, 80% según Root *et al.* (2003), se desplaza hacia los polos o hacia las partes más altas a una velocidad de 6.1 km por década (Parmesan & Yohe 2003). Algunos eventos del ciclo de vida como la floración en las plantas y la oviposición en insectos se están presentando más temprano en la primavera, 2.3 días por década (Parmesan & Yohe 2003) lo que se correlaciona directamente con un aumento en la temperatura mínima local (Mones *et al.* 2001). Observaciones fenológicas en 77 sitios permanentes distribuidos en Europa (Menzel & Fabian 1999) con clones genéticamente idénticos de varias especies de árboles y arbustos indican que la estación de crecimiento se ha ampliado ya que desde 1959 eventos de primavera como la floración se presentan en promedio seis días antes, y eventos de otoño como el cambio de color y la caída de las hojas, se presentan en promedio cinco días más tarde. Sin embargo, también se encontró que de las más de 1500 especies consideradas en los análisis de Parmesan & Yohe (2003) y los de Root *et al.* (2003) son muy pocas las que responden al rápido cambio climático moviendo su rango de distribución. Lo anterior sugiere que la velocidad del cambio climático rebasa la velocidad de las

tasas de migración de la mayoría de las especies (Malcom *et al.* 2002), beneficiando así, a unas cuantas especies oportunistas de dispersión rápida (Bazzaz 1996).

Entre los cientos de artículos científicos revisados aquí, quizá la mejor clasificación de las respuestas de la biota al cambio climático sea la presentada por Hughes (2000) en cuatro categorías: 1) respuesta fisiológica, reflejada en cambios en procesos tales como la fotosíntesis y las tasas de crecimiento; 2) cambios en la distribución geográfica de las especies y de los ecosistemas a causa del desplazamiento de las zonas climáticas hacia mayores altitudes y/o latitudes; 3) cambios fenológicos reflejados en alteraciones de los ciclos de vida de las especies por efecto del fotoperíodo o de la cantidad de horas frío; y 4) adaptación al nuevo medio mediante cambios microevolutivos *in situ*. Además, dado que las especies que no lograsen responder de alguna de estas maneras (aquéllas con rangos de tolerancia estrechos, de distribución restringida, o sin mecanismos de dispersión adecuados) tenderán a desaparecer por estrés fisiológico (Hughes 2000; Bazzaz 1996; González *et al.* 2001). Los cambios fisiológicos, fenológicos, de distribución y la adaptación *in situ*, afectarán las relaciones ínter específicas actuales (Root *et al.* 2003; Bazzaz 1996; Harrington *et al.* 1999), lo que a su vez desencadenará más cambios en distribución así como la extinción de otras especies dando lugar a notables cambios en la estructura y composición de las comunidades (Figura 2.3). Se estima que uno de los efectos más graves del cambio climático es la extinción de especies (Bazzaz 1996; Huntley 1998), y con ello el empobrecimiento de la biodiversidad

y el deterioro de los procesos ecológicos que mantienen el funcionamiento de los ecosistemas actuales.

2.6 Prioridades en Investigación

Quienes trabajan con recursos naturales enfrentan el reto de realizar estudios para detectar los efectos que el cambio climático está teniendo sobre la biosfera y predecir y prevenir los efectos del mismo a futuro. Para ello se requiere continuar realizando estudios experimentales bajo condiciones controladas así como experimentos observacionales que permitan conocer lo que está sucediendo en condiciones naturales. El mantenimiento y desarrollo de colecciones científicas y de bases de datos biológicos de largo plazo juegan un papel de gran importancia para validar predicciones y para realizar muchos de los estudios relacionados con la respuesta de los organismos al cambio climático, sobre todo aquellos que abordan aspectos fenológicos y de distribución geográfica.

Algunas líneas de investigación que consideramos prioritarias son:

- Interacciones actuales entre organismos y predicción de interacciones futuras.
- Sucesión vegetal y recuperación a medida que los ecosistemas comienzan a adaptarse a las nuevas condiciones ambientales.
- Fenología en gradientes altitudinal, latitudinal y temporal.

- Cambios en distribución geográfica, desplazamiento de poblaciones (regeneración o propágulos).
- Ecotonos en gradientes altitudinal y latitudinal: factores determinantes de los mismos y proyecciones a futuro.
- Bancos de propágulos en el suelo.
- Respuesta al cambio climático por diferentes grupos funcionales.
- Análisis de los archivos naturales del clima como anillos de crecimiento de los árboles y las capas de hielo de los glaciares.
- Sistematización y análisis de la información disponible sobre respuesta de los organismos al cambio climático.

2.7 Lecturas Recomendadas

El cambio climático y sus efectos sobre la biosfera son temas de los que se habla y se escribe mucho a nivel mundial. En esta sección se enlistan artículos científicos selectos y algunas páginas de Internet, que en conjunto, darían al lector una panorámica completa de lo que se sabe en la actualidad sobre cambio climático y de lo que a nivel internacional se está haciendo por conocer más al respecto.

Desde hace unas dos décadas empezaron a proliferar artículos científicos relacionados con este tema. El lector interesado podría realizar búsquedas electrónicas y encontraría cientos de referencias; recomendamos empezar por

las siguientes: Mann *et al.* (1998 y 1999), Hughes (2000), Jacoby *et al.* (1997), Bazzaz (1996), Peters (1985), Harrington *et al.* (1999), y Smith & Uppenbrink (2001).

Por otra parte, en la Internet se pueden encontrar muchísimas páginas que abordan el tema. Sin embargo, vale la pena hacer notar que no todas ellas son objetivas y que algunas son evidentemente tendenciosas. Tres páginas con respaldo científico, objetivas y muy bien elaboradas son: La del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <http://www.grida.no/climate>; la del Global Change and Terrestrial Ecosystem (GCTE), <http://www.gcte.org>; y el sitio sobre calentamiento global de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos <http://www.epa.gov/globalwarming>.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco EN EL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

3.1 Resumen

Se construyeron cinco cronologías para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Occidental. Se muestrearon árboles en dos nuevos sitios y se usaron datos disponibles de tres sitios adicionales. Todas las cronologías se correlacionan entre sí ($r = 0.33$ hasta 0.72 ; $p < 0.0001$). Se analizó la asociación de cada cronología con los datos climáticos de cuatro estaciones meteorológicas. La precipitación total se correlaciona bien con los índices de crecimiento; la temperatura máxima se correlaciona de manera inversa, menos, pero significativamente (hasta $r = -0.58$, $p < 0.0001$); las temperaturas mínimas y promedio no muestran correlación con el crecimiento. La cronología de Las Bayas se correlaciona muy bien con la precipitación total regional de noviembre a mayo y de noviembre a agosto ($r^2 = 0.66$ $p < 0.0001$ y $r^2 = 0.73$ $p < 0.0001$ respectivamente). Utilizando los índices de crecimiento como variable independiente se reconstruyó la precipitación total de noviembre a mayo de 1681 a 2001 y la temperatura máxima de invierno (enero-marzo) de 1655 a 2001. La reconstrucción de precipitación indica una disminución de la lluvia

durante las últimas cuatro décadas mientras que la reconstrucción de la temperatura máxima indica que ésta ha aumentado en el mismo periodo.

3.2 Introducción

El estudio de la variabilidad climática en el norte de México es importante ya que se relaciona con El niño/Oscilación del sur –ENSO– (Cavazos 1998, Stahle *et al.* 1998), fenómeno que afecta la variabilidad del clima a nivel mundial y que tiene un impacto particularmente fuerte sobre los patrones de humedad de las zonas subtropicales (Walker & Steffen 1999). Por otra parte, la lluvia en la Sierra Madre Occidental juega un papel muy importante en la economía regional y nacional, tanto en producción forestal como en la regulación del agua: Más del 25% de la producción de madera a nivel nacional se cosecha en Durango (INEGI 1999), y los bosques de ésta área son la principal fuente de agua de importantes regiones agrícolas en los estados de Sinaloa, Nayarit y Coahuila.

Uno de los principales problemas para el estudio de la variabilidad y del cambio en el clima es la escasez de registros climáticos instrumentales. La red de estaciones meteorológicas aún es muy pobre, tanto en tiempo como en espacio. En México existen amplias zonas geográficas no cubiertas y son muy pocas las estaciones meteorológicas con registros previos a 1940. Con el auxilio de la dendroclimatología es posible reconstruir el clima mediante

modelos de regresión gracias a la relación que existe entre los índices de crecimiento anual y los factores climáticos.

Para este estudio se seleccionó a *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, uno de los pocos árboles de origen boreal presentes en México. Esta especie se ha utilizado previamente con éxito en diferentes regiones del mundo, incluyendo el norte de México (Villanueva-Díaz & MacPherson 1996; Stahle *et al.* 1999; Díaz *et al.* 2002), para estudios dendroclimáticos debido a que muestra una marcada sensibilidad a variaciones en el clima y a otros factores ambientales reflejada en sus anillos de crecimiento anual.

Objetivos particulares:

- a) desarrollar cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de diferentes sitios en Durango y analizar la correlación entre las mismas.
- b) analizar la asociación entre el crecimiento anual y las variables climáticas locales y regionales (precipitación y temperatura).
- c) utilizar la mejor correlación entre los índices de crecimiento y los factores climáticos para reconstruir éstos últimos.

3.3 Área de Estudio

Para este estudio se analizó el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* y su relación con el clima considerando cinco sitios en la Sierra Madre Occidental.

Se realizó trabajo de campo en dos sitios del Sur del estado de Durango, Las Bayas y Altos del Epazote. Adicionalmente se utilizaron datos de crecimiento de otros tres sitios de la región: Cerro Barajas en el Noroeste de Durango, El Salto en el Sur de Durango, y Sierra de Valparaíso en el Oeste de Zacatecas (Cuadro 3.1; Figura 3.1).

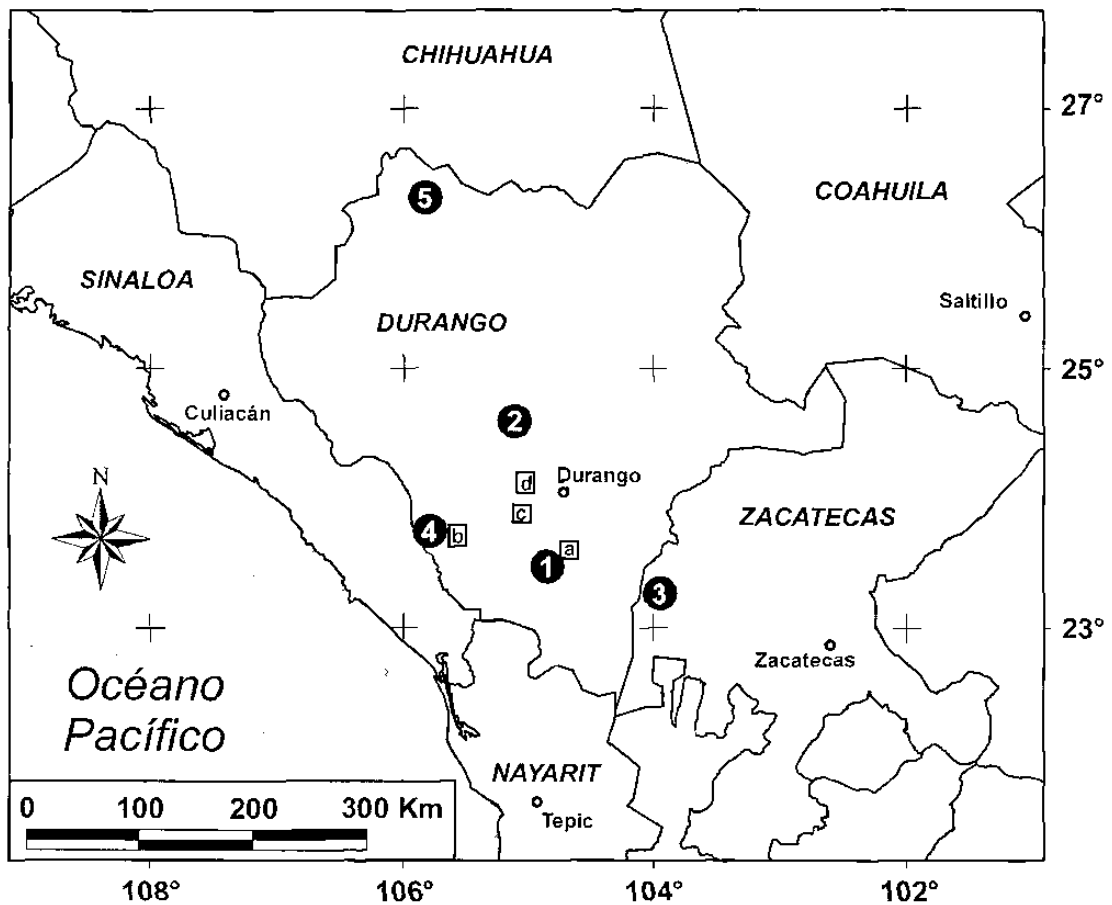


Figura 3.1 Ubicación geográfica del área de estudio. Sitios con datos sobre crecimiento anual: 1) Las Bayas, 2) Altos del Epazote, 3) Sierra Valparaíso, 4) El Salto, 5) Cerro Barajas. Estaciones meteorológicas consideradas: a) Las Bayas, b) El Salto, c) Navíos, d) Otinapa.

Clave	Nombre	Coordenadas	Elevación (m s.n.m.)	Fuente
BAY	Las Bayas	23°27' – 104°51'	2950	Este trabajo (sitio principal)
EPA	Altos del Epazote	24°36' – 105°07'	2950	Este trabajo y proyecto IAI (datos inéditos)
VAL	Sierra de Valparaíso	23°13' – 103°57'	2758	Proyecto IAI (datos inéditos)
SAL	El Salto	23°45' – 105°45'	2590	International Tree-Ring Data Bank
BAR	Cerro Barajas	26°24' – 106°05'	3170	International Tree-Ring Data Bank

Cuadro 3.1. Sitios con datos de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* en la región.

El área de estudio, por su ubicación entre las regiones Holártica y Neotropical, y por la complejidad de su fisiografía y climas, presenta una gran variedad de ecosistemas en donde predominan los bosques de pino y/o encino (González-Elizondo 1983). Los bosques mixtos de coníferas ocupan sitios con elevaciones principalmente sobre los 2700 m. *Pseudotsuga menziesii* (ayarín, pinabete) predomina en los bosques mixtos de coníferas más extensos presentes en la región en cañadas y laderas húmedas generalmente con exposición norte; *Abies durangensis* y *Picea chihuahuana* se restringen a áreas más pequeñas en unos cuantos sitios de la Sierra Madre Occidental (González-Elizondo 1997). El principal sitio de colecta para este estudio, Las Bayas, se ubica en la región

alta de la cuenca del Río Mezquital, reconocido como un centro de diversidad y endemismo vegetal en América (Davis *et al.* 1997) por ser una región con alta riqueza florística en donde se estima que existen alrededor de 2900 especies de fanerógamas, más del 75% de las que se conocen actualmente para el estado de Durango (González-Elizondo 1997).

La vegetación natural en los sitios de estudio consiste en bosques mixtos de coníferas dominados por *Pseudotsuga menziesii* y generalmente una o dos especies de *Pinus* (*P. durangensis*, *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *P. leiophylla*). Algunos arbustos presentes en el sotobosque son: *Arbutus* spp., *Garrya wrightii*, *Ribes ceriferum* y *Vaccinium geminiflorum*. La cubierta herbácea es diversa, incluye pastos, hierbas y helechos como *Muhlenbergia virescens*, *Panicum bulbosum*, *Poa annua*, *Pedicularis* spp., *Phacelia platycarpa*, *Heterotheca chihuahuana*, *Aquilegia skinneri*, *Fragaria mexicana*, *Chimaphila maculata* y *Pteridium aquillinum*. En el sitio de Las Bayas existen árboles muertos en pie, tocones y troncos de *Pseudotsuga menziesii* en diferentes estados de descomposición que podrían usarse para ampliar la cronología que se construyó durante este estudio.

Clima

En la mayoría de los sitios de la región en los que se presenta *Pseudotsuga menziesii* prevalecen climas del tipo C(E)(w₂) de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por E. García para la república Mexicana. Estos climas son semifríos subhúmedos con lluvias en verano. En los sitios de estudio la

precipitación total anual en promedio aproximado es de 950 mm, presentándose principalmente en verano (de junio a septiembre). Con temperatura media del mes más frío (enero) de 7°C, y en el mes más caliente (julio) de 15.5°C.

3.4 Metodología

Se construyeron cinco cronologías de *Pseudotsuga menziesii* para la región utilizando técnicas tradicionales en dendrocronología (Swetnam *et al.* 1985, Fritts & Swetnam 1989) para la colecta y preparación de las muestras. Para el análisis de la calidad y para la estandarización de los datos se utilizaron los programas Cofecha (Holmes 1996) y Arstan (Cook & Holmes 1996) respectivamente. Se analizó la correlación entre las cinco cronologías, y entre los índices de crecimiento de cada una de ellas y los factores climáticos. Se reconstruyeron factores climáticos mediante modelos de regresión.

3.4.1 Colecta de muestras en dos sitios

Durante 2001 y 2002 se realizaron visitas a varios sitios con poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* en el Sur del estado de Durango con el fin de seleccionar una población con características apropiadas para los estudios dendroclimáticos (con árboles viejos y por lo menos algunos creciendo sobre suelo poco profundo para garantizar mejor sensibilidad a factores climáticos). Mediante un amplio recorrido en el predio Las Bayas se detectó un sitio con bosque de *Pseudotsuga* con presencia de individuos sobremaduros en el que

además existen algunos tocones de árboles extraídos recientemente (Figura 3.2). Adicionalmente se seleccionó una segunda población, con menos individuos viejos, en los Altos de la Sierra El Epazote por ubicarse en uno de los sitios de mayor altitud en la región.

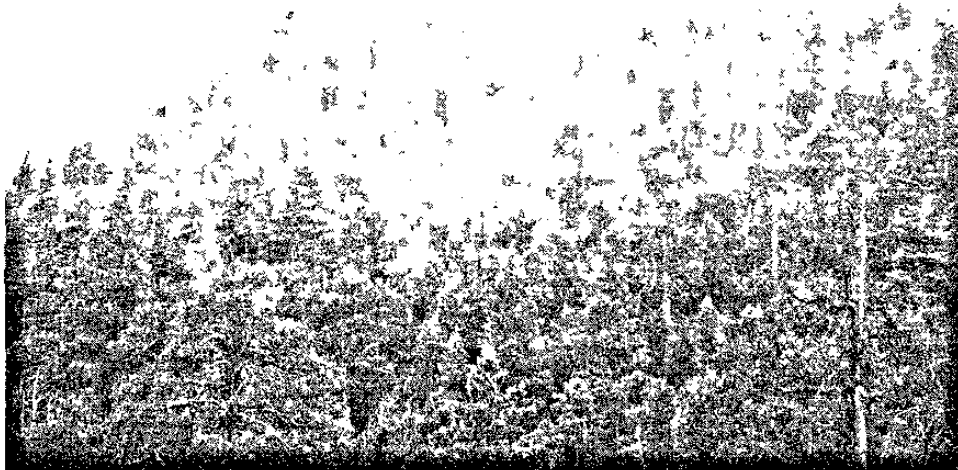


Figura 3.2 Cerro La Grulla, sitio principal de colecta en el predio Las Bayas.

En ambos sitios se muestrearon árboles en pie (la mayoría vivos) así como algunos tocones de árboles derribados recientemente en Las Bayas (Figura 3.3 a y b). Se colectaron al menos dos núcleos de crecimiento (o virutas) por árbol y secciones transversales de algunos tocones. Con el fin de obtener una cronología lo más amplia posible se buscaron los árboles de apariencia más

vieja caracterizados por copas irregulares, ramas altas y gruesas, corteza gruesa y en espiral (Figura 3.3 c). Las virutas se extrajeron de los fustes a una altura promedio de 1.3 m desde el suelo a ambos lados del árbol en dirección perpendicular a la pendiente del terreno. Se guardaron en popotes transparentes, con ventilación para propiciar el secado y debidamente etiquetados con localidad, fecha, especie, número de muestra, exposición de cara muestreada, diámetro normal y condiciones generales del vigor del árbol.

3.4.2 Obtención de Datos de Crecimiento Preexistentes de Tres Sitios

Con el fin de explorar la representatividad regional de los datos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* de Las Bayas, además de las colectas adicionales en la Sierra El Epazote, se obtuvieron datos de crecimiento (ancho total de anillo) de otros dos sitios del estado de Durango registrados en el International Tree-Ring Data Bank (ITRDB): Datos de El Salto ubicado en el sur del estado, relativamente cerca de los dos sitios de colecta, y datos del Cerro Barajas ubicado al noroeste del estado, aproximadamente a 350 km en línea recta de Las Bayas. Así mismo se obtuvieron los datos inéditos de una colecta reciente en la Sierra de Valparaíso, un sitio al oeste del estado de Zacatecas. Los datos del Cerro Barajas se utilizaron a pesar de ubicarse a gran distancia del sitio principal de este estudio por ser la cronología más amplia de *Pseudotsuga menziesii* en México (618 años).

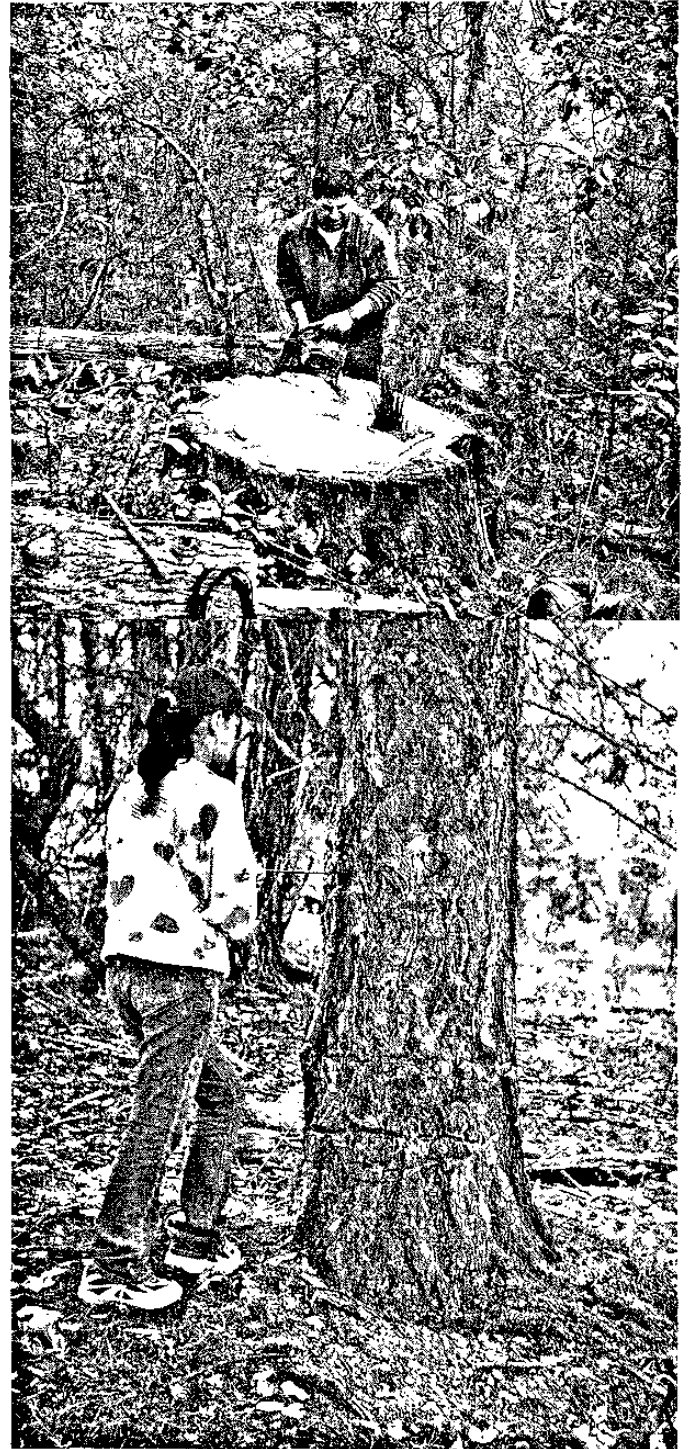


Figura 3.3 Colecta de muestras

3.4.3 Preparación y Fechado de Muestras

En laboratorio se procedió a preparar las muestras mediante las técnicas tradicionales en dendrocronología (Swetnam *et al.* 1985): a) montaje y pegado sobre molduras de madera con las traqueidas en posición vertical para facilitar la observación de los anillos de crecimiento; b) pulido con lijas sucesivamente de grano más fino (100, 220, 320 y 400) hasta obtener una superficie en la que se aprecian las estructuras celulares (Figura 3.4); c) conteo preliminar de anillos en cada muestra a partir de los más viejos, y marcaje a lápiz de las decenas, cincuentenas y centenas con uno, dos y tres puntos respectivamente; d) elaboración de representaciones gráficas (*skeleton plots*) de la secuencia de anillos sobresalientes (por ser muy grandes o muy pequeños) de algunas de las muestras con mayor cantidad de anillos; e) comparación cruzada de las representaciones gráficas de muestras individuales y elaboración de una representación gráfica promedio (*composite skeleton plot*) del crecimiento de los árboles del sitio de colecta con asignación del año exacto de formación de cada anillo; f) fechado y marcaje de cada muestra (décadas, medios siglos, siglos, microanillos, anillos falsos y anillos perdidos); g) medición de anillos individuales con una precisión de 0.01 mm utilizando dendrómetro Velmex y software Medir (Krusic *et al.* 1996). Se midió el ancho total de los anillos de crecimiento anual (madera temprana y madera tardía juntas), en el caso de las muestras de Las Bayas también se midió por separado el ancho de la madera temprana.

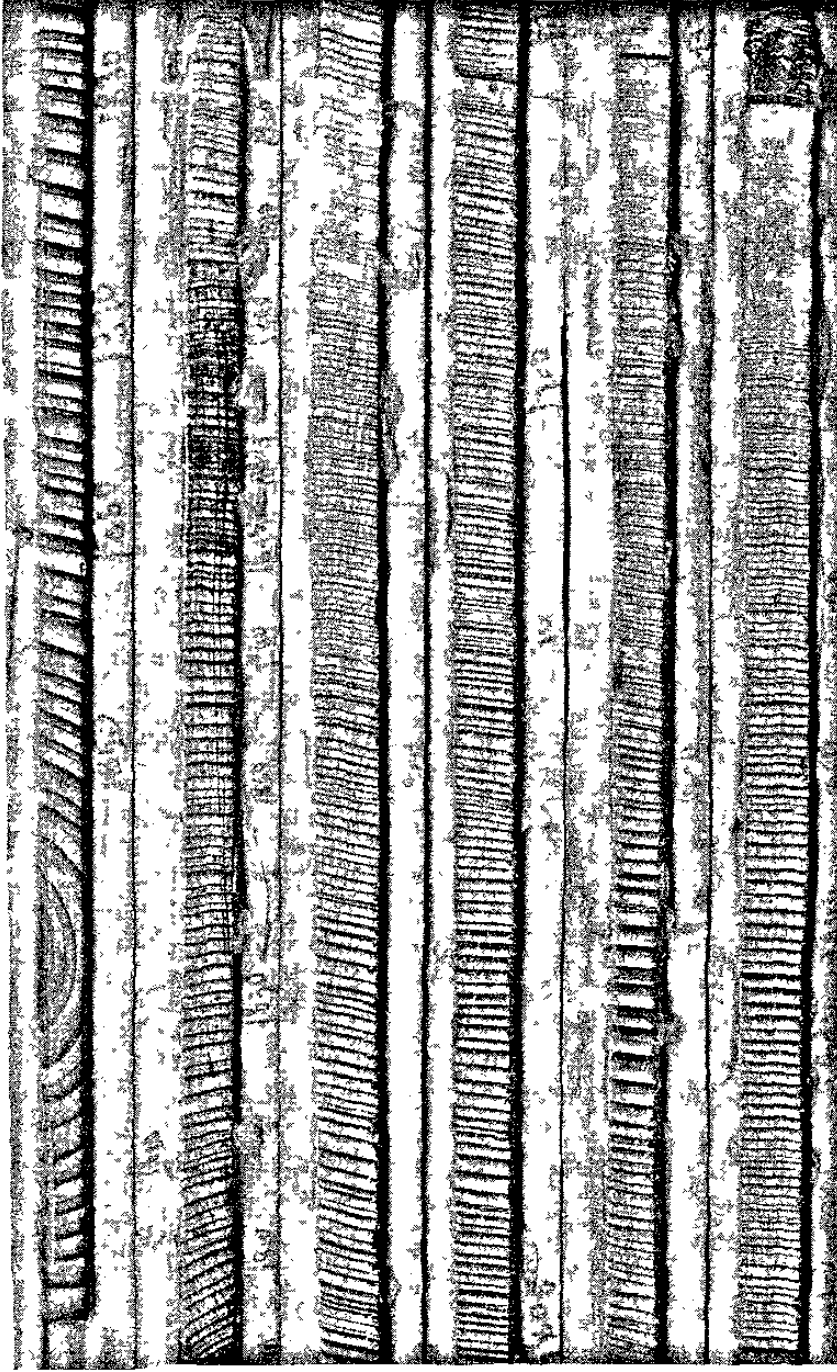


Figura 3.4 Procesamiento de muestras

3.4.4 Control de Calidad de los Datos

Las series de datos de crecimiento de cada uno de los cinco sitios considerados se sometieron a un control de calidad mediante el programa Cofecha (Holmes 1996). Este programa hace un resumen de las estadísticas descriptivas del conjunto total de los datos. Además, construye una serie maestra asignando valores medios a cada uno de los años representados en las series individuales e indica el número de árboles considerados en cada año. También revisa estadísticamente el fechado de cada serie correlacionando sucesivamente segmentos sobrepuestos de 50 años de cada serie individual con la serie maestra desarrollada con las muestras restantes. Da indicaciones de segmentos pobremente correlacionados con la serie maestra que podrían representar posibles problemas de fechado y/o de medición en dichos segmentos.

El programa Cofecha también indica las mediciones de anillos individuales considerados estadísticamente como *outliers*, es decir anillos excesivamente anchos o demasiado angostos al compararse con la distribución de las mediciones de anillos en las diferentes series para el mismo año. Después de correr Cofecha se descartaron algunas series completas y segmentos de otras para evitar algunos *outliers* o por dificultades en el fechado.

3.4.5 Desarrollo y Análisis Comparativo de Cronologías

El término cronología, o cronología de anillos de crecimiento, se refiere a una serie de valores que representa los promedios de los índices de crecimiento

anual estandarizados y debidamente fechados obtenidos a partir de virutas extraídas de árboles de un sitio particular (Fritts 1976). Una vez verificada la calidad del fechado y de la medición mediante Cofecha, se procedió a utilizar el programa Arstan (Cook & Holmes 1996) el cual genera cronologías a partir de las series de anillos de crecimiento anual una vez fechados y medidos. Este programa estandariza cada serie individual, removiendo la varianza debida a factores biológicos, como la edad y el crecimiento radial así como la varianza debida a productividad diferente entre micrositios y cambios en el ambiente de los árboles no relacionados con el clima (Fritts 1976, Cook *et al.* 1990). Arstan maximiza la varianza debida a factores ambientales que afectan a la población en conjunto (e.g. factores climáticos y atmosféricos).

Para remover la influencia de los procesos fisiológicos relacionados con la edad, procurando al mismo tiempo conservar las variaciones de baja frecuencia relacionadas posiblemente con tendencias de cambio en el clima, se escogió ajustar una línea de tendencia rígida a cada una de las series individuales utilizando técnicas ordinarias como regresión lineal o exponencial negativa, las cuales son métodos conservadores que remueven solamente las tendencias monotónicas (Cook & Peters 1981). En seguida se obtuvo para cada serie individual, un índice de crecimiento para cada año dividiendo el valor real de ancho del anillo entre el valor correspondiente en la curva, si el crecimiento real es igual o excede el valor estimado, el índice generado será un valor igual o mayor de uno. Por último se promediaron los índices anuales de las series individuales obteniendo así la cronología correspondiente. El programa Arstan

produce tres versiones de cronologías, Standard, Residual y Arstan, para todos los análisis de este trabajo se utilizó la versión Standard que a diferencia de las versiones Residual y Arstan, retiene las variaciones de baja frecuencia útiles en el análisis de tendencias en períodos largos (Grissino-Mayer 1995).

Las estadísticas descriptivas obtenidas para las cronologías de cada uno de los sitios se compararon entre si para determinar la potencialidad dendroclimática relativa de las cronologías de Las Bayas. La respuesta de las cronologías al clima se refleja en la sensibilidad media, la desviación estándar, la autocorrelación y la relación signo-ruido. Se considera que una cronología tiene buen potencial dendroclimático si cuenta con las siguientes características: fuerte variación de alta frecuencia (e.g. alta sensibilidad media), desviación estándar alta, baja autocorrelación de primer orden y alta correlación entre series (Villanueva 1995).

La sensibilidad media es una medida de la diferencia relativa entre los valores de dos anillos consecutivos y toma valores de cero a dos; cero cuando no hay diferencias entre anillos consecutivos y dos cuando uno de los valores es cero (anillo perdido) y el siguiente es diferente de cero (Fritts 1976).

La autocorrelación se refiere a la correlación entre los anillos de una misma serie. La autocorrelación de primer orden se refiere a la que existe entre el anillo de un año particular (t) con la del anterior ($t-1$) o con la del siguiente ($t+1$) (Fritts 1976). La autocorrelación refleja la variación de baja frecuencia y es

producida por el efecto retardado de condiciones favorables o desfavorables que siguen afectando al árbol, directa o indirectamente, aún después del año en que ocurren.

La relación signo-ruido es una medida de la variación del ancho de los anillos *producida exclusivamente por las condiciones climáticas*. Por lo tanto, los patrones de crecimiento determinados en gran medida por el clima tendrán una relación signo-ruido más grande. Por el contrario, cuando los patrones de crecimiento están más determinados por competencia o por disturbio, la relación signo-ruido será menor (Fritts 1976).

3.4.6 Desarrollo de Modelos Climáticos

Para investigar la asociación entre la variabilidad del clima y la variabilidad en el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en el área de estudio se utilizaron los datos de las cuatro estaciones meteorológicas de la región con más de 30 años de registros climatológicos (Cuadro 3.2). Se consideraron las cuatro estaciones más cercanas, tanto en distancia horizontal como en elevación, a tres de los cinco sitios de estudio: Las Bayas, Altos del Epazote y El Salto (Figura 3.1).

Nombre	Período	Coordenadas		Altitud	Clima
Las Bayas	1964-2001	23°30'	104°49'	1840	C(E)(w2)(b')(e)
El Salto	1940-2001	23°47'	105°22'	2560	C(E)(w2)(b')(e)
Navíos	1964-1999	23°54'	105°03'	2492	C(E)(w2)(b')(e)
Otinapa	1963-1999	24°03'	104°59'	2400	C(E)(w1)

Cuadro 3.2. Estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio con más de 30 años de registros climáticos.

Es un hecho conocido que en las zonas tropicales y subtropicales el crecimiento de los árboles obedece más a las variaciones en el factor lluvia que a las variaciones en el factor temperatura. Por tal motivo los estudios dendroclimáticos que se han realizado anteriormente en la región no han considerado el factor temperatura. Sin embargo, con el fin de buscar posibles tendencias de cambio, en el presente estudio además de considerar la relación precipitación-crecimiento, también se explora la relación del crecimiento con la temperatura.

Para identificar el factor climático y el periodo del año más importantes para el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* en el área de estudio, se obtuvo el valor r (producto momento de Pearson) y su probabilidad de que $r = 0$, entre los índices de crecimiento anual de las cronologías de la región y los datos mensuales y estacionales de precipitación total, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima. En el caso de la precipitación se

obtuvieron correlaciones de cada una de las cinco cronologías utilizando los datos de cada una de las cuatro estaciones meteorológicas de manera individual así como un promedio simple regional. En el caso de la temperatura el análisis preliminar de los resultados de correlación con los índices de crecimiento reveló correlaciones más bien bajas por lo que solamente se obtuvieron las correlaciones entre los datos de crecimiento de la cronología de Las Bayas y los datos de la estación meteorológica Las Bayas así como entre los datos de crecimiento de cada una de las cronologías y los promedios simples regionales de las cuatro estaciones meteorológicas.

Dado que el crecimiento anual de los árboles es afectado por las condiciones climáticas tanto de la estación de crecimiento como por las condiciones prevalecientes en los meses anteriores a ella, para los análisis de correlación se consideraron 18 meses: los 12 meses del año calendario en el que se forma el anillo y los últimos 6 meses del año anterior (julio del año anterior a diciembre del año de crecimiento). Los datos de los meses individuales que se correlacionaron significativamente con el crecimiento se combinaron (promediando en el caso de temperaturas y sumando en el caso de precipitación) para obtener los datos climáticos estacionales los cuales a su vez se correlacionaron con los datos de crecimiento.

Para explorar la asociación entre índices de crecimiento y factores climáticos se seleccionó el período de 1964 a 1993 ya que: (i) las cronologías de El Salto y de Cerro Barajas llegan solamente hasta 1993, (ii) el período común de inicio de

registros meteorológicos en las diferentes estaciones empieza a partir de 1964, (iii) por lo menos en la estación meteorológica Las Bayas faltan algunos datos a partir de 1994. Además, dada la disponibilidad de datos climáticos en la estación El Salto desde 1939, también se obtuvieron los valores de r entre los índices de crecimiento y los datos de lluvia de 1940 a 1993.

Con base en las correlaciones más altas y estables detectadas entre los índices de crecimiento y los factores climáticos, se ajustaron modelos de regresión lineal para reconstruir precipitación y temperatura. Se reconstruyeron y analizaron, la precipitación de noviembre a mayo y la temperatura máxima regional de enero a marzo.

Debido a lo reducido del período en el que se cuenta con registros climáticos confiables se descartó el proceso de verificación que resulta deseable en este tipo de estudios. Para esto se requeriría dividir la serie de datos climáticos en dos partes lo cual resultaría en detrimento del número de observaciones para construir los modelos de predicción, y por lo tanto, de los grados de libertad usados para calcular la significancia del modelo de regresión en la ecuación final (Briffa *et al.* 1990).

Se analizó la dinámica de la correlación entre los índices de crecimiento y los registros meteorológicos. Para determinar posibles cambios en la asociación entre el clima y el crecimiento, se graficaron los coeficientes de correlación

entre los índices de crecimiento y el clima en períodos sobrepuestos de 10 años a partir de 1965.

3.5 Resultados y Discusión

3.5.1 Calidad de los Datos y Obtención de Cronologías

3.5.1.1 Sitio las Bayas

Se obtuvieron dos series maestras para los datos de crecimiento anual de Las Bayas: ancho total de anillo, de 347 años (1655 – 2001); y madera temprana, de 321 años (1681 – 2001). En el caso de ancho total de anillo, el programa sólo detectó 2 segmentos -de un total de 597- pobremente correlacionados con la serie maestra correspondiente. Esto indica, además de una alta correlación entre las muestras, que el proceso de conteo, identificación de anillos falsos o de anillos perdidos y la asignación de fechas se realizó con precisión. En el caso de madera temprana, el programa Cofecha detectó una mayor cantidad de segmentos pobremente correlacionados con la serie maestra. Esto indica, descartando errores en el fechado, influencia de factores endógenos o factores que afectan a árboles en particular (Cuadro 3.3).

Para mejorar la calidad de las cronologías y de las reconstrucciones climáticas a obtener, se descartaron algunas series individuales completas y segmentos de algunas otras.

	Ancho total	Madera temprana
Serie fechadas	70	62
Serie maestra	1655 – 2001	1681-2001
Total de anillos medidos	14,242	12,145
Anillos perdidos	20	12
Intercorrelación entre series	0.783	0.773
Sensibilidad media	0.317	0.371
Segmentos con posibles errores	1 de 585	1 de 503
Longitud media (años)	203.5	195.9

Cuadro 3.3 Resumen comparativo de los resultados de Cofecha para ancho total de anillo y para madera temprana de las series de crecimiento de Las Bayas.

3.5.1.2 Todos los sitios

El análisis de los resultados de Cofecha para los cinco sitios (Cuadro 3.4, Apéndice A, Cuadros A1 a A5) indica intercorrelación entre series y sensibilidad media aceptables en todos los sitios aunque ambos valores son relativamente bajos en el caso de los datos de El Salto. La intercorrelación entre las series de Las Bayas es comparable con la que hay entre las series del Cerro Barajas y superior a la del resto de los sitios. La sensibilidad media de las series de Las Bayas es mayor que la de las series de El Salto pero menor que la de el resto de los sitios. La longitud media (número de años considerados) de Las Bayas es sólo superada por la de El Salto, y comparable con la de Cerro Barajas a pesar de que el período que abarca la serie maestra de este último sitio es mucho más prolongado, esto se debe a la baja profundidad de muestra de la cronología de Cerro Barajas (sólo un árbol con 5 repeticiones representa la cronología desde 1376 hasta 1651). Las series de Las Bayas muestran

autocorrelación relativamente baja con respecto a 3 de los 4 sitios restantes. Aunque la de Las Bayas no es la serie maestra más larga de la región, sí es la de mayor profundidad de muestra ya que de las 70 series consideradas, 26 inician antes de 1750, mientras que en el caso de las series de Cerro Barajas solamente 12 de 38 y en el caso de El Salto 10 de 30 series inician antes de 1750.

3.5.2 Características de las Cronologías Construidas

Se generaron cronologías de ancho total de anillo y de madera temprana para Las Bayas y de ancho total de anillo para el resto de los sitios (Figura 3.5 a-e). En el apéndice B se incluyen las versiones estandarizadas de cada cronología. El análisis comparativo de las estadísticas descriptivas de las cronologías (Cuadro 3.5) indica que todas estas, excepto la de El Salto, tienen características similares. Esto permitirá construir una nueva cronología regional con las series de datos de crecimiento de todos los sitios combinados.

3.5.3 Potencial dendroclimático

Las dos cronologías de Las Bayas (ancho total de anillo y madera temprana) resultan superiores al resto de las cronologías consideradas por lo menos en cuanto al mayor valor de la relación signo-ruido y en los valores relativamente bajos de autocorrelación (Cuadro 3.5). Ambas características favorecen el potencial dendroclimático de esta cronología y obedecen en gran medida a la mayor cantidad de muestras consideradas para su construcción.

	BAY	EPA	SAL	VAL	BAR
Series fechadas	70	48	30	35	38
Primer año	1655	1675	1702	1863	1376
Último año	2001	2001	1993	2001	1993
Período (años)	347	327	292	139	618
Anillos medidos	14,242	5,625	5,723	3,918	7,843
Anillos perdidos	20	11	4	1	19
Segmentos (posibles errores)	585 (1)	237 (2)	219 (3)	171 (0)	302 (1)
Intercorrelación	0.783	0.706	0.653	0.722	0.768
Sensibilidad media	0.317	0.381	0.269	0.384	0.406
Longitud media (años)	203.5	117.2	190.8	111.9	206.4
Autocorrelación 1 ^{er} . ord.	0.712	0.632	0.863	0.646	0.536

Cuadro 3.4 Resumen comparativo de los resultados de Cofecha para los datos de ancho total de anillo de las series de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* de los cinco sitios considerados.

Estadísticas	Bay AT	Bay MT	Epa	Sal	Val	Bar
Media	0.9887	0.9902	0.9947	1.0028	0.9637	0.973
Sensibilidad media	0.2561	0.2621	0.3229	0.1869	0.2996	0.3806
Desviación estándar	0.2447	0.2475	0.3277	0.2582	0.2756	0.3649
Autocorrelación primer orden	0.2458	0.2208	0.3427	0.5968	0.1600	0.2037
Autocorrelación segundo orden	0.0671	0.0619	0.1019	0.2074	0.1529	0.1195
Varianza debida a la autoregresión (%)	5	3.8	1	43.1	4.9	6.5
Error de la varianza	0.0022	0.0023	0.0101	0.0099	0.0049	0.0073
Correlación entre muestras	0.421	0.428	0.394	0.388	0.421	0.43
Correlación entre árboles	0.419	0.425	0.386	0.378	0.421	0.419
Correlación entre m. un árbol	0.629	0.67	0.769	0.671	0.603	0.73
Relación Signo – Ruido	20.174	0.18476	14.452	9.131	22.526	10.798
Varianza en el primer eigenvector (%)	44.96	45.97	43.75	44.63	44.82	47
Media de intervalo común	1.009	1.006	0.993	0.995	0.985	0.97
Desviación estándar del intervalo común	0.237	0.241	0.259	0.321	0.285	0.28
Período	1655-2001	1655-2001	1675-2001	1702-1993	1863-2001	1376-1993
Número de años/árboles/muestras	347/48/70	347/44/60	327/29/48	292/17/30	139/34/35	618/18/38
Período común	1808-1987	1807-1987	1913-2000	1847-1993	1911-2001	1871-1992
Número de años/árboles/muestras	180/28/36	181/25/30	88/23/35	147/15/24	91/31/32	122/15/24

Cuadro 3.5 Resumen comparativo de las estadísticas descriptivas de las cinco cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la región. Bay AT, Las Bayas ancho total de anillo; Bay MT, Las Bayas madera temprana; Epa, Altos del Epazote; Val, Sierra Valparaíso; Sal, El Salto; Bar, Cerro Barajas.

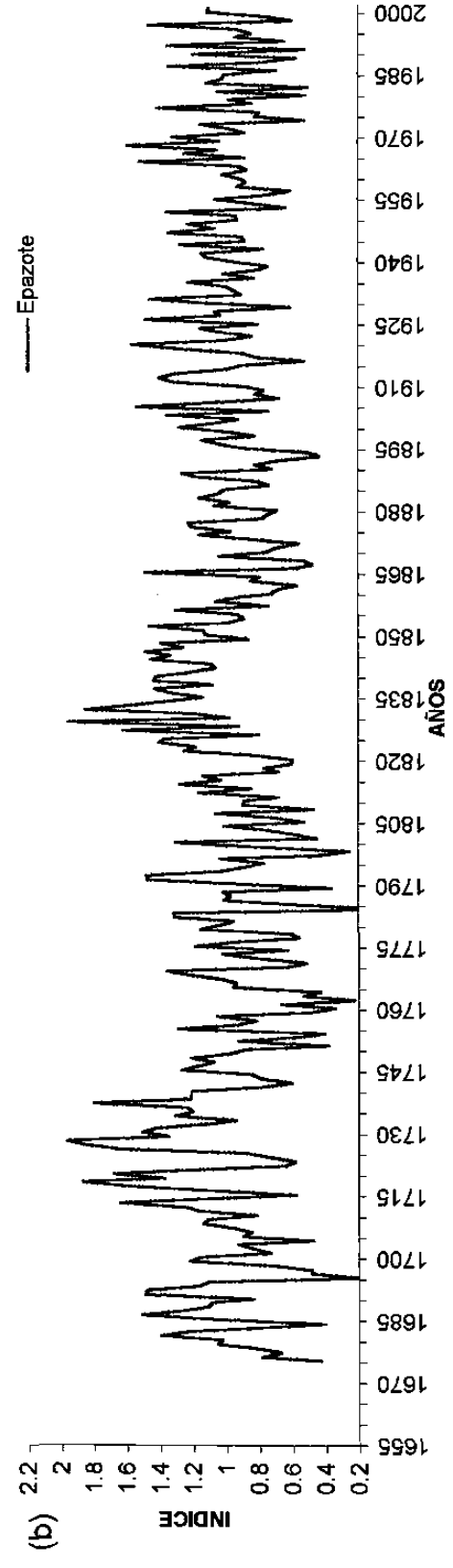
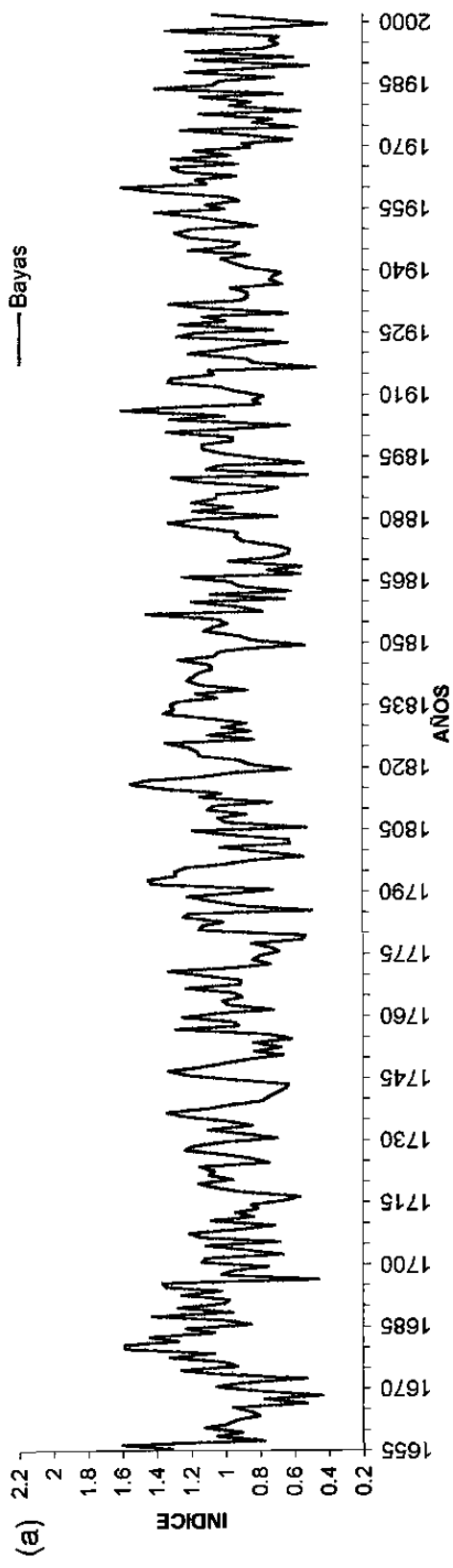


Figura 3.5 Cronologías de ancho total de anillo de *Pseudotsuga menziesii*:

- a) Las Bayas, Mpio. De Pueblo Nuevo, Durango
- b) Altos del Epazote, Mpio. Canatlán, Durango

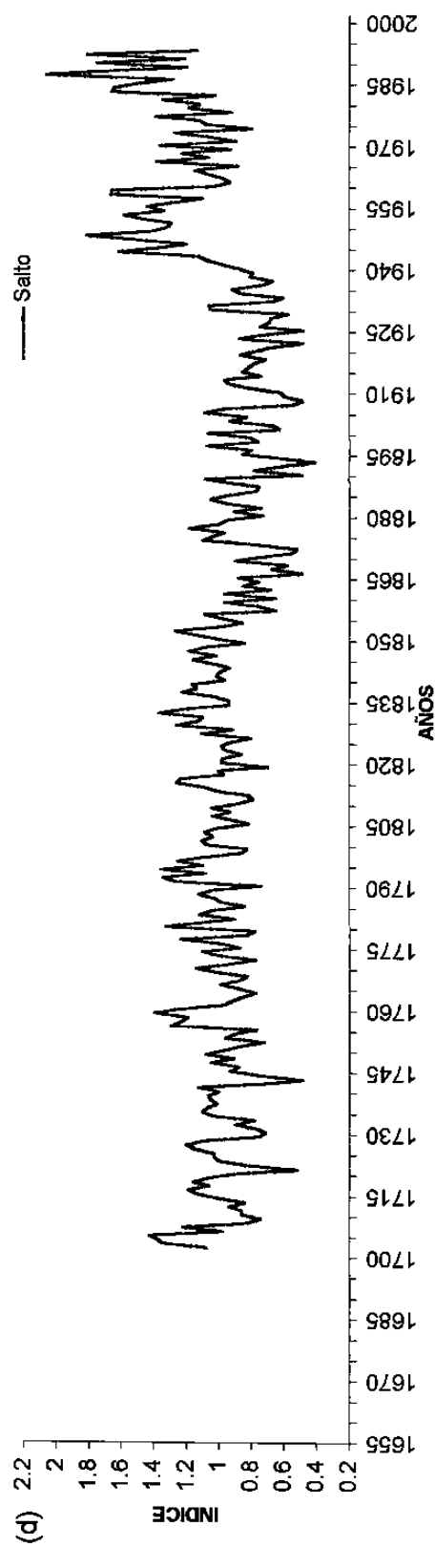
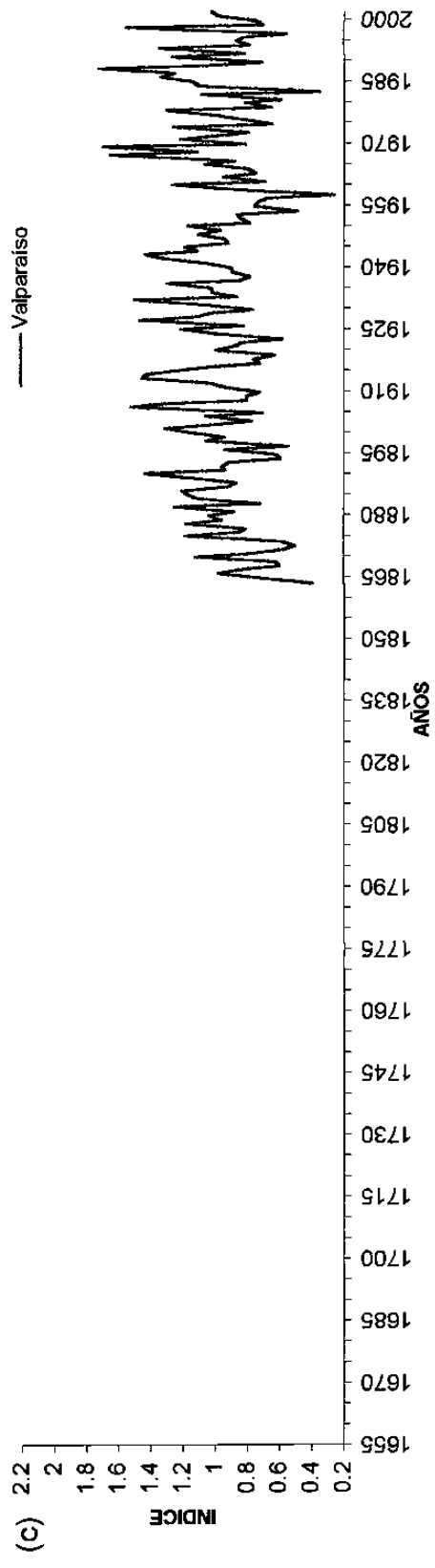


Figura 3.5 Cronologías de ancho total de anillo de *Pseudotsuga menziesii*:

c) Sierra Valparaíso, Zacatecas

d) El Salto, Mpio. Pueblo Nuevo, Durango

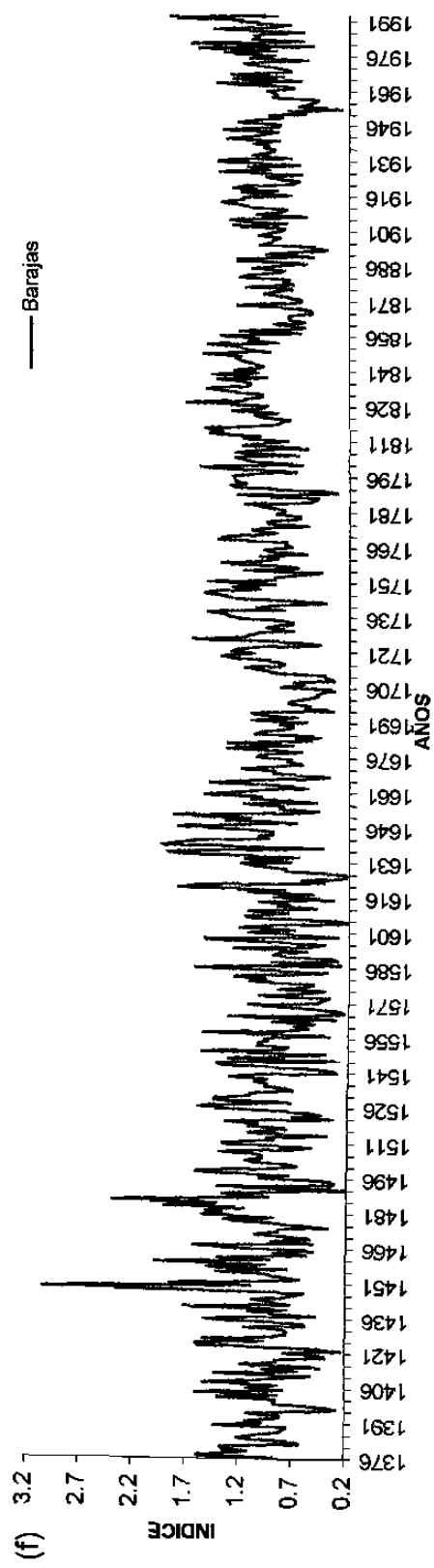
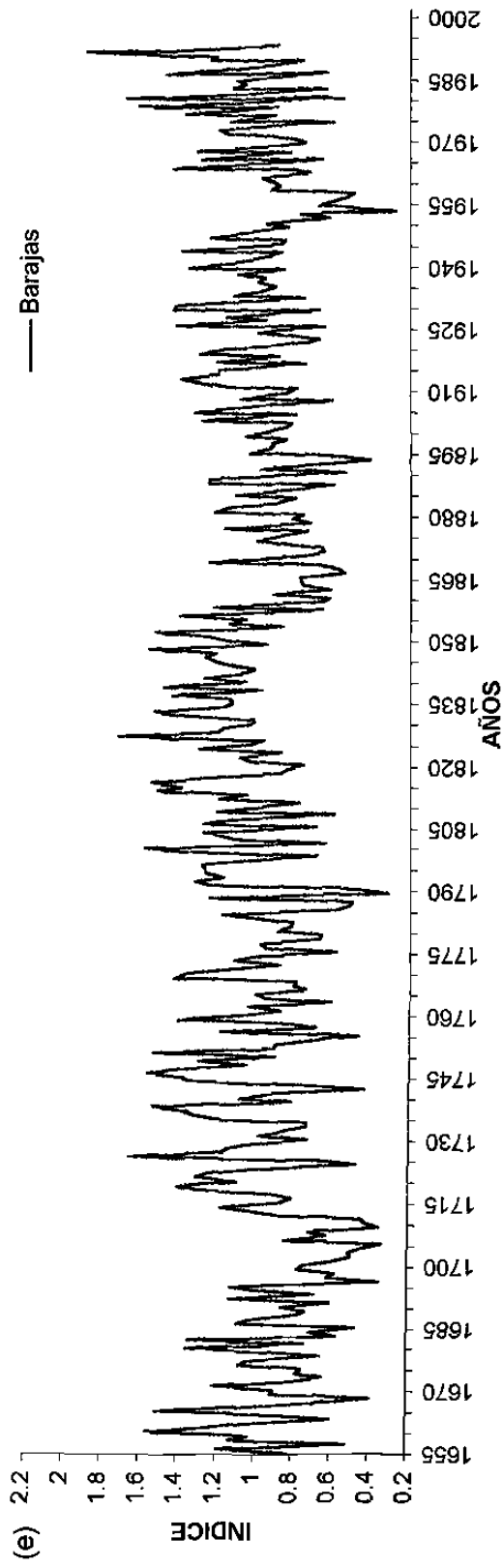


Figura 3.5 Cronologías de ancho total de anillo de *Pseudotsuga menziesii* en Cerro Barajas, Mpio. Guanaceví, Durango. e) 1655-1993, f) 1376-1993

3.5.4 Correlación entre Cronologías

La correlación entre las diferentes cronologías varía según el período que se considere. Sin embargo el orden en que unas cronologías se correlacionan con otras se mantiene más o menos estable (Apéndice B, Cuadro B 6). Con el fin de comparar la correlación entre las cinco cronologías se consideró el periodo común a todas: 1863 a 1993 (Cuadro 3.6).

	Las Bayas	A. Epazote	El Salto	Valparaíso	C. Barajas
Las Bayas	1				
A. Epazote	0.69	1			
El Salto	0.51	0.35	1		
Valparaíso	0.58	0.72	0.38	1	
C. Barajas	0.48	0.67	0.33	0.64	1

Cuadro 3.6 Correlación entre las cinco cronologías de la región ($p < 0.0001$) considerando el período común entre todas (1863-1993).

La cronología de Las Bayas se correlaciona bien ($p < 0.0001$) con el resto de las cronologías de la región, principalmente con la de los Altos del Epazote y con la de la Sierra de Valparaíso; éstas a su vez presentan entre sí la correlación más alta ($r = 0.72$). Solamente la cronología de El Salto presenta valores bajos de correlación con 3 de las otras 4 cronologías. La cronología de Las Bayas es la única que coeficientes de correlación altos con las cuatro cronologías restantes. La de Altos del Epazote se correlaciona mejor con dos

de las cronologías restantes en el período de correlación considerado. La baja correlación de la cronología de El Salto se debe principalmente a la segunda mitad del siglo XX, pues durante el siglo XIX y primera mitad del siglo XX la cronología de El Salto presenta mayores valores de correlación con el resto de las cronologías (Apéndice B, Cuadro B 6).

3.5.5 Correlación Crecimiento-Precipitación

Las correlaciones más altas entre los índices de crecimiento de cada una de las cinco cronologías y la lluvia total de los meses individuales corresponden a los meses de noviembre a marzo, seguidos por mayo (abril en el caso de la cronología de Cerro Barajas) y agosto (Figura 3.6). La lluvia total estacional de diferentes combinaciones de estos meses presenta correlaciones más altas que la de los meses individuales (Figura 3.7). Los resultados de los análisis de correlación entre los índices de crecimiento y la lluvia local y regional se presentan en el apéndice C, Cuadros C1 a C6. Todas las cronologías se correlacionan de manera similar con la lluvia regional aunque la cronología de Cerro Barajas presenta en general valores de correlación más bajos. Esto se explica por la mayor distancia (300 Km en promedio) que existe entre el sitio de esta cronología y los sitios en los que se localizan las estaciones meteorológicas consideradas. Las cronologías que parecen relacionarse mejor con los datos de precipitación regional son las dos de Las Bayas: ancho total de anillo (AT), y madera temprana (MT). Sin embargo, en el caso de la lluvia de

verano, aunque todas las cronologías muestran valores de correlación bajos, los menos bajos son los de la cronología de Sierra de Valparaíso en Zacatecas.

La precipitación regional total de noviembre del año anterior a agosto del año de crecimiento (79% de la lluvia total anual), es la que resultó ser la variable climática que mejor explica la variabilidad en los índices de crecimiento. La correlación más alta se registró entre la cronología de la madera temprana en Las Bayas (BAY MT) y la lluvia de noviembre a agosto con un alto valor de significancia ($r = 0.86$, $p < 0.0001$) explicando un 73% de la variación total en el crecimiento radial. La precipitación total de noviembre a octubre del mismo periodo (lluvia total en un año) sólo explica un 57 % ($r = 0.75$, $p < 0.0001$) y la de los meses más lluviosos de verano (julio agosto), que representa más del 40% de la lluvia anual, solamente explica un 17% ($r = 0.41$, $p < 0.03$) de la variación total en el crecimiento radial.

Otros períodos de lluvia también se correlacionan de manera significativa con los índices de crecimiento de los diferentes sitios. Entre ellos destaca la precipitación total de fines de otoño, invierno y principios de primavera (noviembre a mayo) que en las estaciones meteorológicas de Navíos y El Salto (período desde 1940 en esta última) resulta tener valores de correlación aún más altos que los de la lluvia total de noviembre a agosto. En la estación Otinapa los mayores valores de correlación con 3 de las 5 cronologías los ocupa la lluvia de fines de invierno y principios de primavera de los meses de febrero a mayo (Cuadro 3.7).

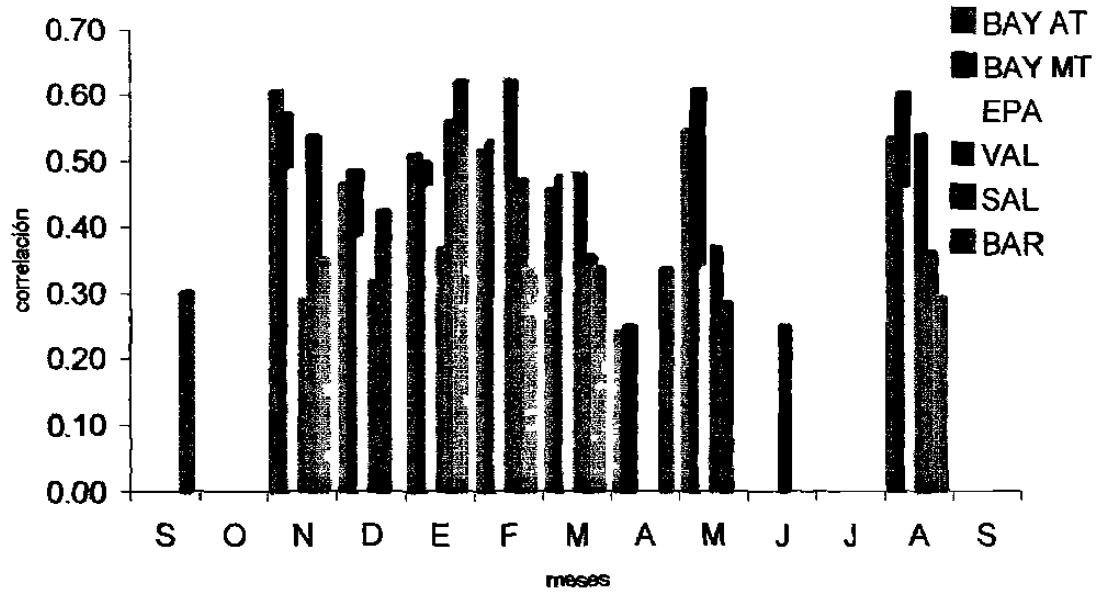


Figura 3.6 Correlación entre los índices de crecimiento de cada una de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la región y la lluvia mensual promedio regional. Cronologías: BAY AT, Las Bayas ancho total; BAY MT, Las Bayas madera temprana; EPA, Altos del Epazote; VAL, Sierra Valparaíso; SAL, El Salto; BAR, Cerro Barajas.

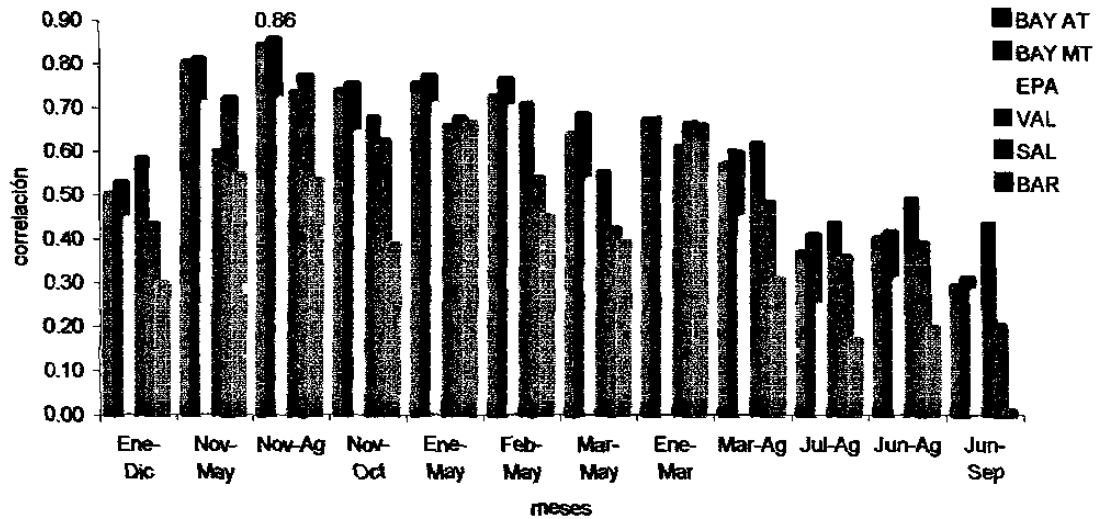


Figura 3.7 Correlación entre los índices de crecimiento de cada una de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* la región y la lluvia estacional o anual promedio regional. Cronologías: BAY AT, Las Bayas ancho total; BAY MT, Las Bayas madera temprana; EPA, Altos del Epazote; VAL, Sierra Valparaíso; SAL, El Salto; BAR, Cerro Barajas.

	BAY AT	BAY MT	EPA	VAL	SAL	BAR
Regional (66-93)	0.84	0.86	0.72	0.76**	0.77	0.66*
Las Bayas (64-93)	0.80	0.80	0.71	0.74**	0.65	0.60**
El Salto (40-93)	0.54‡	0.53‡	0.54‡	0.53‡	0.63‡	0.52‡
El Salto (64-93)	0.76‡	0.76‡	0.61‡	0.63+	0.74++	0.63*
Otinapa (64-93)	0.71‡	0.71+	0.67+	0.61+	0.83	0.66*
Navios (64-93)	0.70‡	0.72‡	0.69‡	0.65+	0.70‡	0.57*

Cuadro 3.7. Correlación más alta entre cada cronología y los datos de precipitación estacional promedio regional y de cada una de las estaciones meteorológicas. Cronologías: BAY, Las Bayas ancho total; BAY MT, Las Bayas madera temprana; EPA, Altos del Epazote; VAL, Sierra Valparaíso; SAL, El Salto; BAR, Cerro Barajas. Precipitación total de: *enero-mayo; **enero-agosto; ‡noviembre-mayo; +febrero-mayo; ++noviembre-febrero; noviembre-agosto sin marca.

Nuestros resultados coinciden con los de Stahle *et al.* (1999) quienes encontraron que la lluvia de invierno (noviembre-marzo) explica el 56% de la varianza de los índices de crecimiento de los últimos 600 años en Durango. Cabe destacar que mientras que la lluvia de invierno y la de invierno y primavera (noviembre a marzo y noviembre a mayo respectivamente) representan aproximadamente 20 y 24% de la lluvia total anual en el área de estudio; la de verano (junio a septiembre) representa casi el 70%. La alta correlación entre el crecimiento y la lluvia de invierno y primavera así como la baja correlación entre el crecimiento radial y la lluvia de verano en el área de estudio podría relacionarse con la mayor intensidad de las precipitaciones en verano lo que a su vez determina un menor porcentaje de infiltración.

El análisis dendroclimático presentado en el presente estudio incluye tres nuevas cronologías: Las Bayas, Altos del Epazote y Sierra Valparaíso. Es relevante como un complemento de los estudios dendroclimáticos previos en la región. A diferencia de las cronologías previas que abarcan hasta 1993, las nuevas cronologías abarcan hasta el año 2001, incluyendo la década completa de los 90's, la cual es de gran importancia en lo que se refiere a la variabilidad climática. Con las nuevas cronologías se extiende la red de datos dendroclimáticos de la región, tanto en tiempo como en espacio, ya que existe un traslape geográfico entre las cronologías y estaciones meteorológicas consideradas en los estudios previos con las de este estudio.

No sobra mencionar que los valores altos de correlación no necesariamente indican causa-efecto. En las matrices de correlación entre el crecimiento y la precipitación (Apéndice C) destacan algunos casos de correlación alta que no pueden considerarse como evidencias de procesos causa-efecto. Por ejemplo la lluvia del mes de noviembre de la estación meteorológica de Otinapa se relaciona inversamente con el crecimiento de los árboles en Las Bayas y en Altos del Epazote ($r = -0.50$ y -0.47 respectivamente) lo cual no es factible ya que la estación de crecimiento de *Pseudotsuga* en el norte de México termina regularmente en el mes de agosto (D. Stahle com. pers.). Otro ejemplo es el caso de la lluvia total del año calendario (enero a diciembre) que principalmente en la estación Las Bayas y en el promedio regional muestra correlaciones significativas con el crecimiento de todos los sitios aunque la lluvia total anual

que de forma natural se correlaciona con el crecimiento sería la de noviembre del año previo a octubre del año de crecimiento.

El valor más alto de la relación signo-ruido de la cronología de Las Bayas con relación a las demás cronologías de la región (Cuadro 3.5) se refleja también en los valores de correlación simple más altos entre estas cronologías y los datos de precipitación tanto de la estación Las Bayas (más cercana al sitio de colecta) como también con la precipitación promedio regional y con la de cada una de las estaciones meteorológicas consideradas.

La cronología de Las Bayas se correlaciona tan bien con la lluvia de las estaciones Navíos y El Salto, como lo hacen las cronologías de Altos del Epazote y El Salto, más cercanas a esas estaciones. Solamente con la precipitación registrada en la estación Otinapa, la cronología de El Salto muestra mejor correlación que la de Las Bayas $-r = 0.83$ y 0.71 respectivamente- (Cuadro 3.7).

Los registros climáticos más antiguos de la región muestran baja correlación con el crecimiento. La correlación entre los índices de crecimiento de cada una de las cronologías y los datos de precipitación de la estación El Salto (período 1940 –1993) muestran valores más bajos que las correlaciones del crecimiento con los datos de precipitación del período 1964 a 1993 del resto de las estaciones meteorológicas e incluso de la misma estación El Salto para dicho período (Cuadro 3.7). Esto sugiere posibles errores de captura de los datos

climáticos aproximadamente durante los primeros 20 años de su existencia (1940 – 1960). Sin embargo, esta discrepancia también podría obedecer a diversas situaciones. Por ejemplo, a que en el clima local de El Salto durante ese período posiblemente se hayan presentado condiciones anómalas (diferentes de las condiciones generales de la región). Esta posibilidad de condiciones climáticas anómalas en El Salto concuerda con la baja correlación de la cronología de esa localidad con el resto de las cronologías regionales que se mencionó en el inciso anterior (Cuadro 3.6). Baja correlación que como se muestra en la Cuadro B6 del apéndice B, parece restringirse a un período alrededor de 1950. Una tercera posibilidad para explicar la baja correlación entre los datos de lluvia de la estación meteorológica El Salto de 1940 a 1960 (Apéndice C, Cuadro C 5) y los índices de crecimiento es que en realidad a nivel regional se haya presentado algún evento que influyó sobre el crecimiento de los árboles de toda la región durante varios años enmascarando la influencia directa del clima anual. De aquí surge la hipótesis de que la severa sequía registrada en la década de los 50's pudo haber afectado en gran medida el crecimiento por lo menos en algunos sitios de la región más allá del período en el cual se presentó.

3.5.6 Correlación Crecimiento-Temperatura

Los resultados de los análisis de correlación entre el crecimiento y la temperatura indican que los valores de temperatura mínima y temperatura media no se correlacionan con los índices de crecimiento. En el caso de los valores de temperatura máxima se detecta una relación inversa entre el

crecimiento de *Pseudotsuga* y la temperatura de los meses de diciembre a marzo, principalmente la de febrero (Apéndice C, Cuadro C 8). Esto podría explicarse por el hecho de que dicha especie es de origen nórdico y en el área de estudio se restringe a cañadas húmedas y frías, o a laderas con exposición Norte en las que las temperaturas llegan a ser más bajas que en los alrededores. A mayor temperatura máxima de invierno es posible que los requerimientos de horas frío necesarios para completar el período de dormancia de *Pseudotsuga* en el área de estudio no se alcancen a satisfacer, y como consecuencia, el crecimiento en la siguiente estación será menor. A diferencia de los bosques nórdicos en donde la temperatura mínima suele ser un importante factor limitante del crecimiento; en el área de estudio es la lluvia el factor climático limitante de mayor importancia. Las temperaturas máximas elevadas parecen afectar de manera negativa al crecimiento (Apéndice C, Cuadro C 9). La correlación negativa entre la temperatura máxima de invierno y el crecimiento sugiere la influencia del déficit hídrico en el suelo al iniciar la estación de crecimiento.

Se detectó una mejor correlación de los índices de crecimiento de Las Bayas con los datos de temperatura regionales que con los datos de la estación meteorológica Las Bayas en particular. Así mismo, se encontraron mejores correlaciones con los datos de varios meses combinados que con los datos de los meses individuales (Figura 3.8, Cuadro 3.8).

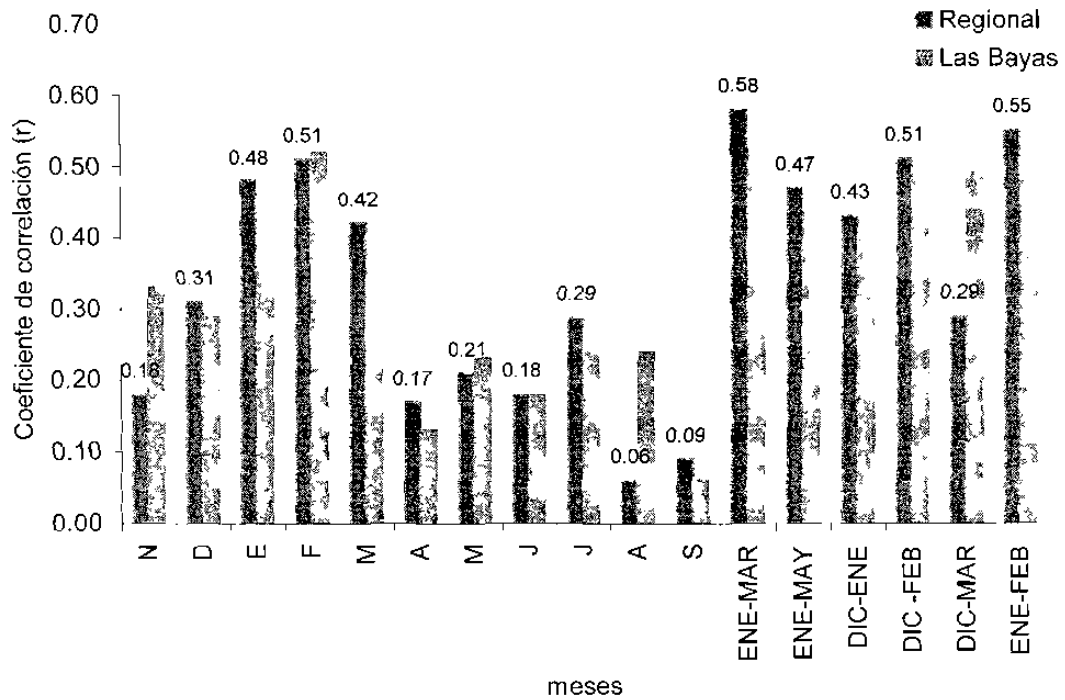


Figura 3.8 Correlación entre los índices de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en Las Bayas (ancho total de anillo) y los datos mensuales y estacionales de temperatura máxima local (estación Las Bayas 1965-1994) y regional (promedio simple de 4 estaciones 1965-2001).

	LAS BAYAS 1965 - 1994	REGIONAL 1965 - 1994	REGIONAL 1965 - 2001
Febrero			
r	-0.52	-0.53	-0.51
r ²	0.27	0.28	0.26
p <	0.003	0.002	0.001
Enero-Marzo			
r	-0.48	-0.56	-0.58
r ²	0.23	0.32	0.34
p <	0.007	0.001	0.0001

Cuadro 3.8 Estadísticas de las regresiones entre los índices de crecimiento y los registros de temperatura máxima mensual (febrero) y estacional (enero-marzo).

De los meses individuales, la temperatura máxima de febrero es la que se asocia de una manera más significativa con el crecimiento. Sin embargo la mejor correlación, y más significativa, es con la temperatura máxima regional de enero a marzo ($r = -0.58$; $p < 0.0001$). Esta explica aproximadamente un 34% de la variación del crecimiento radial. La temperatura registrada particularmente en la estación Las Bayas, explica aún menos (23%) que la temperatura regional con un r de -0.48 y una $p < 0.007$ (Cuadro 3.8).

Una comparación de la correlación entre los índices de crecimiento de las diferentes cronologías obtenidas y la temperatura máxima regional (1965 – 1994) deja ver que, aunque como era de esperarse, los valores de correlación son relativamente bajos, son consistentes entre las diferentes cronologías. En cuatro de los cinco casos la temperatura de los meses de diciembre a marzo se asocia mejor y de manera inversa con el crecimiento radial (Apéndice C, Cuadro C 10). En el caso de la cronología de la Sierra de Valparaíso, la mayor correlación se da con la temperatura del mes de julio, la cual en el resto de las cronologías es también la más alta después de la de los meses de diciembre a marzo.

Las cronologías de Las Bayas y de El Salto se correlacionan de manera similar con la temperatura ($r = -0.55$ y -0.56 respectivamente), mientras que las cronologías de Altos del Epazote y Sierra de Valparaíso muestran las asociaciones más bajas con los datos de temperatura máxima ($r = -0.32$ y -0.33

respectivamente); y la cronología de Cerro Barajas, a pesar de ser la más separada geográficamente de las estaciones meteorológicas consideradas resultó ser la que mejor se asocia con los valores de temperatura máxima regional de diciembre a febrero ($r = -0.62$).

En resumen, los resultados de los análisis de correlación entre crecimiento y clima (precipitación y temperatura) confirman que las condiciones climáticas de invierno y primavera determinan en gran medida la humedad disponible en el suelo durante la siguiente estación de crecimiento. Los inviernos fríos y lluviosos parecen promover el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en el área de estudio. Esto podría estar relacionado con un mejor balance hídrico y con el cumplimiento en cuanto a requerimientos de horas frío de esta especie de origen boreal. Por el contrario, los inviernos con temperaturas máximas altas parecen relacionarse con crecimiento pobre en la siguiente estación. Esta correlación negativa se acentúa si los inviernos además de calientes son secos, lo que a su vez está relacionado con una mayor incidencia de plagas.

3.5.7 Dinámica en la Asociación entre Índices de Crecimiento y Factores Climáticos

La varianza en los índices de crecimiento explicada por algunos factores climáticos ha variado en las últimas décadas mientras que la de otros ha permanecido estable. Esto se puede apreciar con un análisis visual de los resultados de correlación simple entre la cronología estándar de ancho total de anillo de Las Bayas y los datos de precipitación mensuales, estacionales y

sobrepuestas a partir de 1965 (Apéndice C, Cuadro C11 y Figura C1). El caso de la precipitación de verano es el mas evidente en cuanto a cambio, al analizar visualmente la varianza compartida entre la lluvia de verano (julio-agosto y junio-septiembre) y la de los índices de crecimiento, se encontró que la correlación con estos dos factores ha disminuido paulatinamente en las últimas cuatro décadas (Figura 3.9). Por el contrario la asociación del crecimiento con la lluvia de principios de primavera (marzo a mayo), aunque de manera mucho menos evidente muestra una ligera tendencia a aumentar. La lluvia total anual (enero –diciembre), la de noviembre a mayo y la de noviembre a agosto ha mantenido correlación con los índices de crecimiento aparentemente estable en el período de que se dispone de registros climáticos (Figura 3.9).

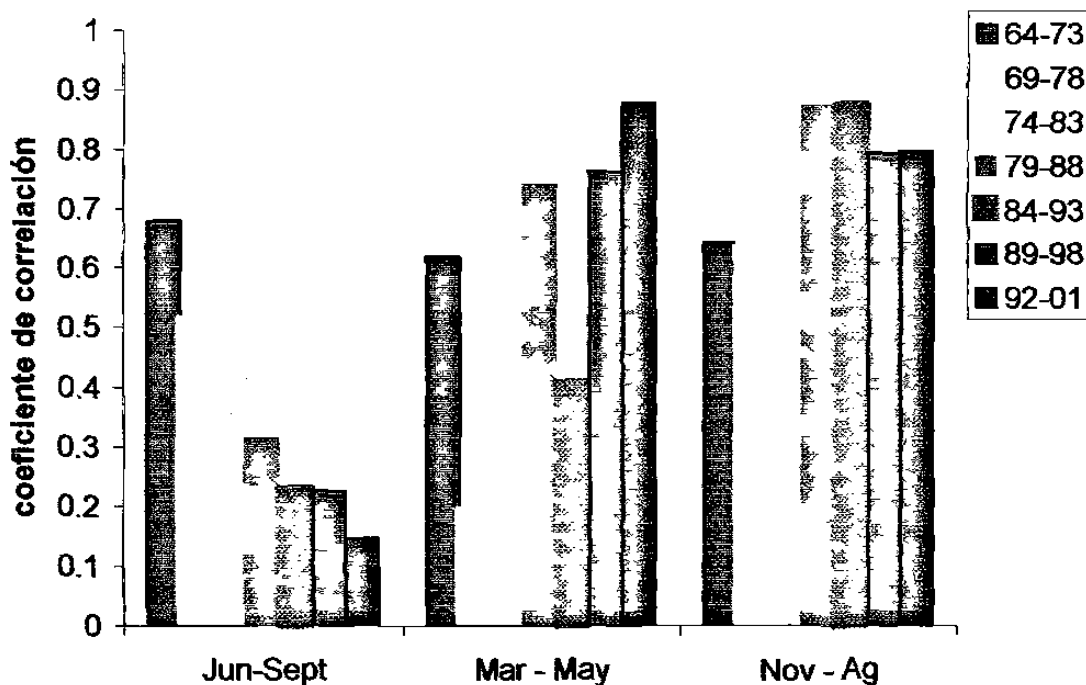


Figura 3.9. Dinámica en la correlación entre crecimiento y precipitación de diferentes períodos a través de las últimas décadas.

3.5.8 Reconstrucción y Análisis de Tendencias en Factores Climáticos

Aunque la lluvia de noviembre a agosto se asocia mejor con el crecimiento que la de noviembre a mayo, se escogió esta última para la reconstrucción de precipitación ya que es un período más adecuado que el de noviembre a agosto por coincidir mejor con los ciclos naturales. La lluvia de noviembre a mayo representa la precipitación de invierno y primavera; mientras que el período de noviembre a agosto incluye además parte de las lluvias de verano, la cual se correlaciona débilmente con el crecimiento radial en el área de estudio. La cronología de Las Bayas tiene potencial dendroclimático para la reconstrucción de ambos períodos y también para la reconstrucción de la precipitación total anual y la de varios períodos mas. En el Cuadro 3.9 se presentan las estadísticas de las regresiones que mejor explican la varianza en el crecimiento radial. En el Cuadro 3.10 se presentan los modelos de regresión correspondientes.

	Pt Nov-Ago	Pt Nov-May	Pt Ene-May	Pt Nov-Oct	Tmx. Ene-Mar
R ²	0.73	0.66	0.60	0.57	0.34
Sx	399.99	347.59	235.45	587.97	0.99
n	28	28	28	28	37
p <	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Cuadro 3.9. Estadísticas de las regresiones entre la cronología estandarizada de Las Bayas (madera temprana en el caso de precipitación y ancho total de anillo en el caso de temperatura) y los promedios regionales de cinco factores climáticos. Pt = precipitación total, Tmx = temperatura máxima.

Factor climático	Modelo
Pt (Nov-Ago)	$Y_i = 763.90 + (2223.32)*X_i$
Pt (Nov-May)	$Y_i = -668.97 + (1635.79)*X_i$
Pt (Ene-May)	$Y_i = -434.77 + (973.24)*X_i$
Pt (Nov-Oct)	$Y_i = 1479.86 + (2294.69)*X_i$
Tmx (ene-mar)	$Y_i = 25.36 + (2.52)*X_i$

Cuadro 3.10. Modelos de regresión para reconstrucción de factores climáticos. En donde Y_i es el valor reconstruido para el año i del factor climático involucrado, y X_i es el valor de la cronología estándar también para el año i .

La reconstrucción de la precipitación regional de noviembre a mayo de 1681 a 2001 (Figura 3.10) muestra varios períodos de sequía con tendencias negativas en la precipitación: 1696-1710, 1751-1755, 1797-1805, 1857-1880, 1916-1929 y el más largo de 1971 a 2001 período en el que según esta reconstrucción se presentaron 5 de los 16 años más secos de los últimos 3 siglos (1974, 1978, 1989, 1991 y 1999). Algunos de los períodos más húmedos reflejados en esta reconstrucción son: 1756-1771, 1812-1842 y 1958-1967. La sequía de los últimos 30 años parece ser la más severa de los últimos tres siglos y formar parte de un ciclo de aproximadamente 100 años. La tendencia negativa de la lluvia de noviembre a mayo a partir de mediados de los 70's en los datos reconstruidos coincide con la tendencia a la baja en los registros climáticos de la estación Las Bayas en el mismo período (Apéndice C, Figura C 2).

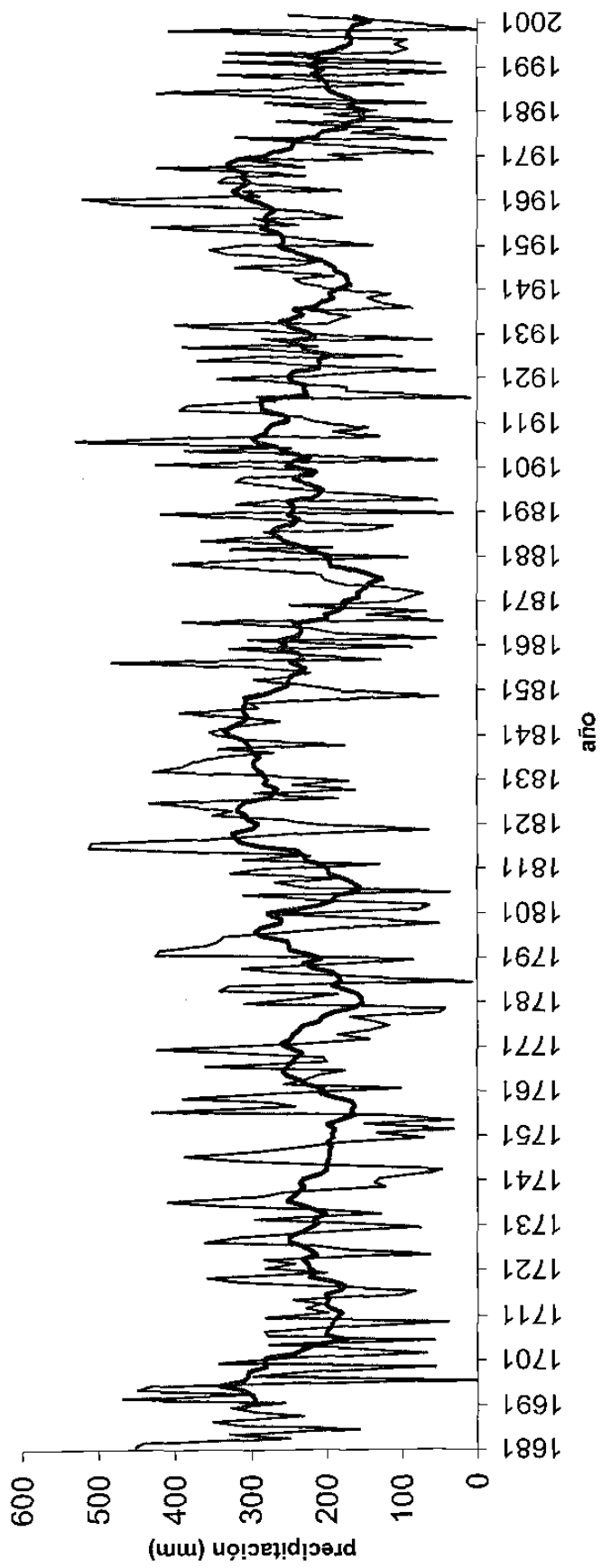


Figura 3.10. Reconstrucción con media móvil de la precipitación promedio regional de noviembre a mayo en el Sur de Durango. Predictores: índices de crecimiento estandarizados de *Pseudotsuga menziesii* (madera temprana, cronología Las Bayas).

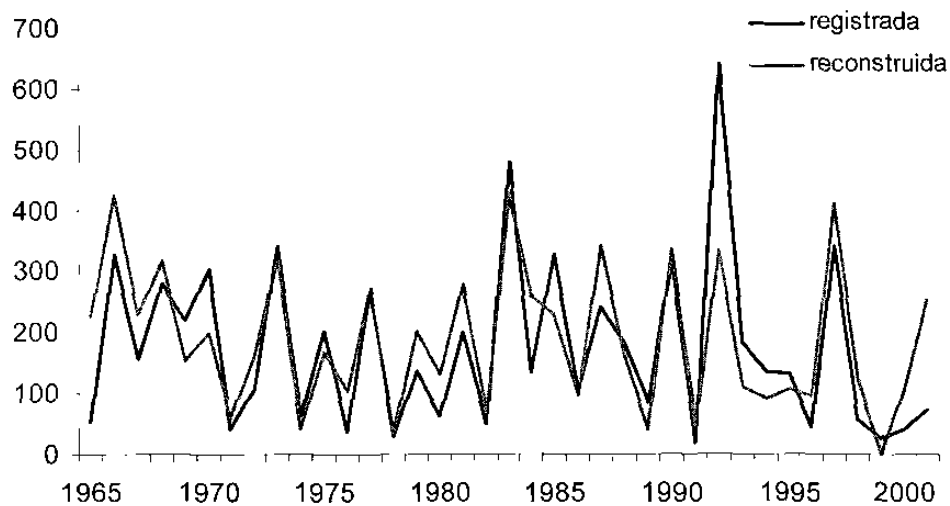


Figura 3.11 Comparación entre los datos reconstruidos y los registrados de la precipitación regional de noviembre a mayo.

En la reconstrucción de temperatura máxima regional se aprecia una tendencia positiva durante la segunda mitad del siglo XX (Figura C2). Esta tendencia no coincide con los registros meteorológicos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la región de la Sierra, pero sí con los de la estación meteorológica de la ciudad de Durango (Figuras C3). Así mismo, con los registros de temperatura mínima de invierno de la estación Las Bayas (Figura C3).

La reconstrucción de la precipitación regional utilizando los índices de crecimiento de *Pseudotsuga* en Las Bayas, coincide en varios aspectos y difiere

en otros con las reconstrucciones de Stahle *et al.* (1999, 2003) para Durango y para Coahuila respectivamente, así como con las de Díaz *et al.* (2002) para Chihuahua. La asociación de la cronología de Las Bayas con el clima es altamente significativa, las tendencias en las reconstrucciones de lluvia y de temperatura coinciden con las tendencias en algunos de los registros climáticos, la relación signo-ruido de la cronología de Las Bayas es alto. De lo anterior se concluye que las diferencias entre la reconstrucción climática de este estudio y las de otros autores son reales y representan variaciones locales del clima regional. Una red más amplia de cronologías sensibles al clima y el estudio de su asociación con registros climáticos de una mayor cantidad de estaciones meteorológicas serviría para determinar áreas con diferentes tendencias en los factores climáticos.

3.6 Conclusiones

Las series de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* de Las Bayas y Altos del Epazote presentadas en este estudio se cruzan muy bien, sobrepasan los 300 años y se correlacionan bien entre sí, así como con las tres cronologías adicionales disponibles para esta región: El Salto, Sierra Valparaíso y Cerro Barajas. Las dos nuevas cronologías muestran los valores más altos de la relación signo-ruido, lo que indica buena asociación con los factores climáticos. Las cinco cronologías analizadas, particularmente la de Las Bayas, se correlacionan significativamente con la precipitación regional por lo que las

reconstrucciones de este factor climático pueden utilizarse como referencia en el estudio de la variabilidad climática regional. Los valores de lluvia total de noviembre a mayo y de noviembre a agosto son los que se correlacionan mejor, y de una manera más estable, con los índices de crecimiento de todas las cronologías consideradas. La temperatura máxima de invierno se correlaciona de manera inversa con el crecimiento. La reconstrucción de la precipitación muestra una tendencia negativa a partir de los 1970's y la de la temperatura máxima una tendencia positiva a partir de los 1940's. Ambas tendencias coinciden con tendencias similares en los registros climáticos de algunas estaciones meteorológicas de la región y con las predicciones de cambio climático.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO ANUAL DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

4.1 Resumen

Se analizaron los índices de crecimiento de cinco cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la Sierra Madre Occidental con el fin de determinar la ocurrencia de tendencias inusuales que pudieran estar relacionadas con cambio climático. En el análisis visual se encontró que solamente en la cronología de El Salto existe un evidente aumento en los índices de crecimiento a partir de la década de los 1940's. Los tres procedimientos estadísticos utilizados (valores z acumulados, prueba de t y regresión) revelan diferente comportamiento en las cronologías incluyendo tanto fluctuaciones comunes como contradictorias en diferentes periodos. Todas las cronologías se comportan de manera similar durante el siglo XIX y durante la primera mitad del siglo XX, mientras que en la segunda mitad del siglo XX se observan patrones diferentes. Durante los últimos 50 años dos de las cinco cronologías muestran aumentos en las tasas de crecimiento, dos se mantienen estables, y una muestra disminución. Esto se interpreta como un aumento en la variación espacial del clima regional que coincide con los registros de algunas estaciones meteorológicas de la región. La alta variabilidad registrada en el clima de la región en la segunda mitad del

siglo XX coincide con un incremento en la variación interanual de los índices de crecimiento de las cinco cronologías.

4.2. Introducción

Existen evidencias de que el crecimiento de las plantas en ecosistemas naturales ha estado respondiendo a las recientes tendencias en calentamiento y en cambios atmosféricos, aunque es difícil separar la relativa contribución de estos dos factores (Hughes 2000). El efecto fertilizante del CO₂ parece estar relacionado con el aumento en las tasas de crecimiento a partir de mediados del siglo XIX, antes de los registros de aumento en la temperatura en la primera mitad del siglo XX (Briffa *et al.* 1998). El posible efecto fertilizante del CO₂ parece más evidente en coníferas subalpinas (Hughes 2000) y se ha estudiado mediante dendrocronología solamente en latitudes y/o elevaciones altas (LaMarche *et al.* 1984; Kienast 1986; Kienast & Luxmoore 1988; Graybill 1993 y 1987; Nicolussi 1995; Jacobi 1997; D'Arrigo 1993; Graumlich 1991). En México se han realizado varios estudios dendroclimáticos, pero ninguno de los reportes científicos publicados hasta la fecha analiza las tendencias en el crecimiento. Con este trabajo se pretende determinar si el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en el Sur de Durango presenta tendencias inusuales durante las últimas décadas con respecto a los últimos siglos que pudieran relacionarse con factores directos o indirectos del cambio climático.

4.2.1 Hipótesis

Existen cambios en los índices de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* a partir de finales del siglo XIX: Es posible detectar ya sea, aumentos coincidentes con el efecto fertilizante del CO₂, ó reducción gradual coincidente con el aumento de temperatura. Además, los cambios en el patrón de precipitaciones y el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos registrado durante la segunda mitad del siglo XX deben reflejarse en el tamaño de los anillos de crecimiento mediante una mayor frecuencia de años indicadores expresados en valores extremos.

4.2.2 Objetivos Particulares

- a) determinar si los índices de crecimiento de las últimas décadas muestran tendencias inusuales con relación a los siglos anteriores.
- b) comparar los índices de crecimiento anual de períodos relacionados con diferentes concentraciones de CO₂ en la atmósfera (1901-1950 y 1951-2000).
- c) comparar la frecuencia de años indicadores en los mismos períodos.

4.3 Metodología

Para analizar las posibles tendencias en los índices de crecimiento que pudieran estar relacionadas con los factores del cambio climático se elaboraron y se analizaron visualmente representaciones gráficas de las cronologías de

Pseudotsuga menziesii de la región (Capítulo 3) y se emplearon procedimientos estadísticos utilizados en estudios previos para análisis de tendencias en series de tiempo (Graumlich 1991; D'Arrigo & Jacoby 1993; Grissino-Mayer 1995; y Navar 2001).

- 1) Valores z acumulados. Para facilitar el análisis visual de las fluctuaciones en el crecimiento, las cronologías de índices de crecimiento se convierten a series de valores z acumulados. Los índices de crecimiento se convierten a unidades de desviación estándar (valores z) restando a cada valor la media de la serie y luego dividiendo entre la desviación estándar de toda la serie (Schlotzhauer & Littell 1987; Barber 1988, citados por Grissino-Mayer 1995); después se obtuvo la cronología de valores z acumulados. Este procedimiento magnifica las fluctuaciones en el comportamiento de los datos.
- 2) Pruebas de t de dos colas para evaluar la significancia de las diferencias en las medias entre períodos (1901-1950 y 1951-2000).
- 3) Ajuste de modelos de regresión ordinarios (cuadrados mínimos) que predicen el crecimiento como una función del tiempo para los mismos períodos con el fin de determinar si los coeficientes que relacionan el crecimiento con el tiempo durante las últimas décadas son tanto positivos como estadísticamente significativos indicando un aumento en los índices de crecimiento.
- 4) Análisis de la frecuencia de años indicadores.

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Análisis Visual de Cronologías

Salvo en el caso de la cronología de El Salto, el análisis visual de los datos graficados de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la región (Capítulo 3, Figura 3.5 a-e) no muestran tendencias evidentes de aumento o de disminución del crecimiento durante las últimas décadas que parezcan únicas al considerar las series completas. Esta falta de tendencia al aumento o a la disminución podría interpretarse como una resultante de la estandarización de los datos, tratamiento estadístico necesario para minimizar las tendencias naturales hacia una reducción en el tamaño de los anillos debido a factores biológicos como la edad y el crecimiento en diámetro. Debido a que durante el proceso de estandarización se utilizaron únicamente métodos conservadores como regresión lineal y exponencial negativa, se presume que tal falta de tendencia general de aumento o disminución en 4 de las 5 cronologías es auténtica. En la cronología de El Salto, en cambio, es evidente un aumento en los índices de crecimiento a partir de 1940. Esta cronología presenta el menor valor en la relación signo-ruido (Capítulo 3, Cuadro 3.5) lo que indica que sus patrones de crecimiento están más determinados por competencia o por disturbio que por los factores climáticos. Esto, parece bastante factible ya que la región de El Salto ha sido una de las zonas de la Sierra Madre Occidental con mayor extracción forestal desde principios del siglo XX. El aumento en los índices de crecimiento de *Pseudotsuga* en El Salto por lo tanto parece

relacionado con una disminución en la densidad ocasionada por extracción forestal.

4.4.2 Análisis de los Valores Z Acumulativos

Las series de valores z acumulativos graficados (Figura 4.1) indican fluctuaciones comunes entre las diversas cronologías analizadas pero también fluctuaciones, a veces contradictorias, entre cronologías en algunos períodos.

Por ejemplo:

- 1) Durante el siglo XIX hasta mediados del siglo XX todas las cronologías con excepción de la cronología de El Salto muestran comportamientos similares;
- 2) Al final del siglo XVII (1673 a 1695), la cronología de Cerro Barajas muestra una caída en los índices de crecimiento que se contrapone a las tendencias positivas de las cronologías de Las Bayas y de Altos del Epazote en el mismo período. La tendencia negativa en los índices de crecimiento de Cerro Barajas se acentúa a partir de 1695, cuando las otras cronologías disponibles también tienden a la baja hasta aproximadamente 1715 cuando se recuperan o se estabilizan;
- 3) En la cronología de El Salto existe una marcada caída en el crecimiento desde mediados del siglo XIX hasta casi mediados del siglo XX, y posteriormente una súbita recuperación, por lo menos hasta 1993, último año con mediciones en la cronología;
- 4) A partir de mediados del siglo XX se observan dos patrones diferentes: En Las Bayas y en El Salto se aprecian tendencias hacia aumentos en

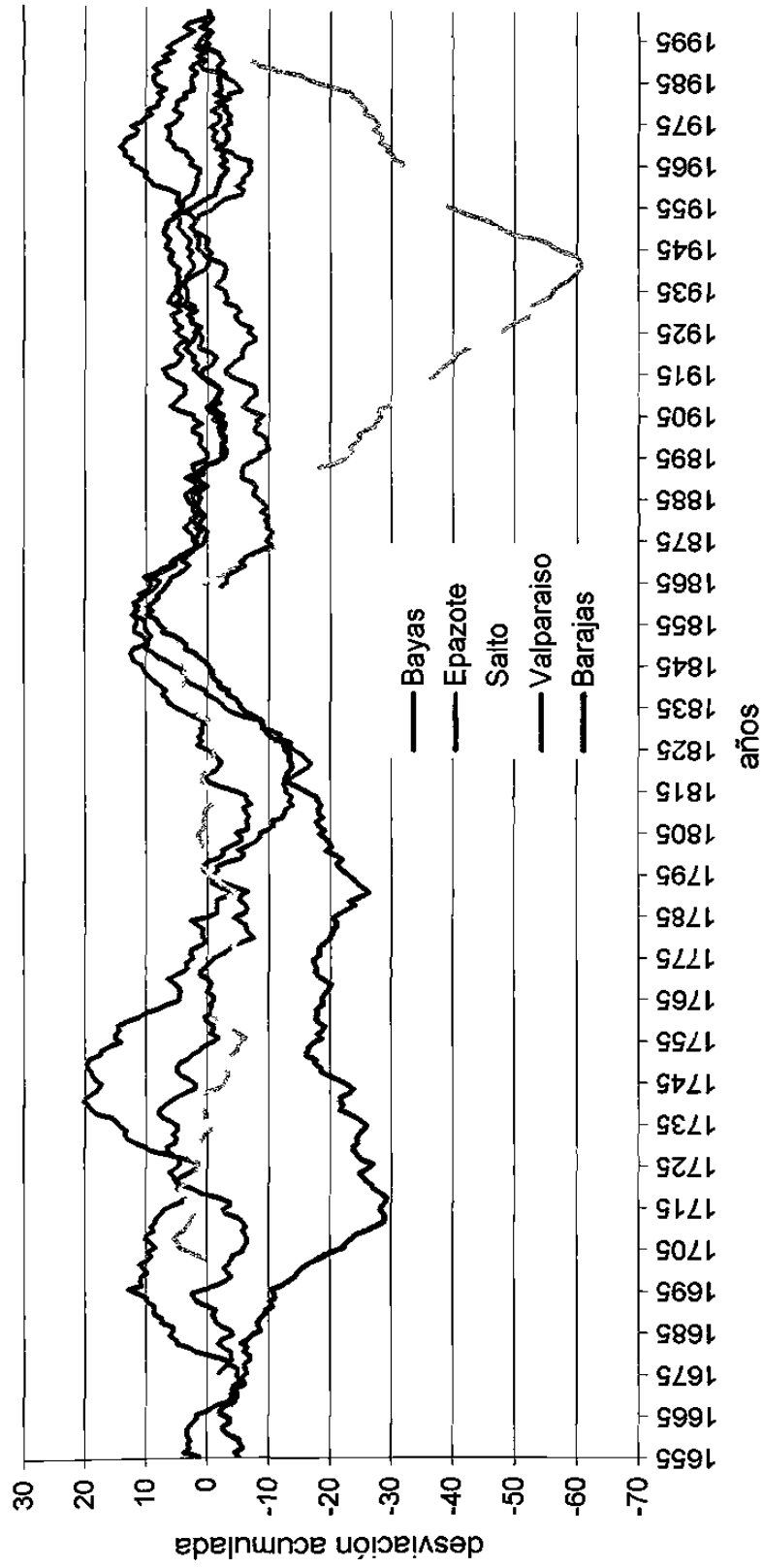


Figura 4.1. Tendencias en los patrones de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* de la Sierra Madre Occidental estimadas mediante las unidades de desviación estándar (valores z) acumulados de las cinco cronologías regionales.

los índices de crecimiento de 1950 a 1965, mientras que Sierra de Valparaíso y Cerro Barajas las tendencias son a la baja;

- 5) En Altos del Epazote coincide con la tendencia a la baja de Cerro Barajas hasta 1962, pero después tiende a recuperarse y sigue el mismo patrón en asenso de Las Bayas hasta finales de los 1960's para posteriormente iniciar una caída en el crecimiento que duró al menos hasta 2001.

Las tendencias contradictorias entre cronologías durante algunos períodos podrían deberse a variaciones locales del clima de la región. Sin embargo, por lo menos en los casos de las bajadas en los índices de crecimiento de Cerro Barajas (1673-1695) y de El Salto (a partir de 1895) también podrían ser el reflejo de factores de disturbio como daño severo de copa o ataques de plagas.

Las tendencias opuestas en la década de 1950 muestra que las cronologías de Las Bayas y de El Salto *no parecen haber sido afectadas por la severa sequía* reportada por Stahle (1999) para dicho período y que por el contrario sí es evidente en las cronologías de Altos del Epazote, Sierra Valparaíso y Cerro Barajas. Las tendencias contrarias entre el crecimiento de diferentes sitios a partir de mediados del siglo XX, no son tan marcadas como las que se registran en los siglos XVII y XVIII (a partir de 1673, de 1726 y de 1795). Las tendencias contrarias en el crecimiento de diferentes sitios en la segunda mitad del siglo XX podrían considerarse como evidencias de cambio climático, sin embargo, antes se tendría que probar que las grandes diferencias en el comportamiento

de las cronologías durante los siglos XVII y XVIII resultan de una pobre profundidad de muestra¹ en dichos períodos y no de una alta variabilidad en el clima regional de esa época.

Contrario a las expectativas sobre aumentos en el crecimiento relacionados con la fertilización por CO₂, salvo en la cronología de El Salto, el análisis visual de las unidades de desviación estándar de las cronologías analizadas (Figura 4.1) no revela aumentos en los incrementos durante las últimas décadas. Por el contrario se registran caídas en el crecimiento por lo menos en Las Bayas y en Altos del Epazote. Al menos en Las Bayas, las tendencias durante las últimas décadas en los registros climáticos asociados con el crecimiento (disminución en precipitación de invierno y primavera en la estación Las Bayas, Apéndice C, Figuras C 2), aunado a observaciones de campo, permiten especular que la posible causa de dicha caída puede ser estrés hídrico seguido por un ataque de descortezadores. Además en los registros de la estación meteorológica de Las Bayas se detectó un aumento en las temperaturas mínimas de invierno y en la estación meteorológica de la ciudad de Durango un aumento en las temperaturas máximas de invierno (Apéndice C, Figuras C 2).

4.4.3 Prueba de Medias (t)

Los resultados de las pruebas de *t* para comparar los índices de crecimiento de dos períodos representativos de diferentes niveles de CO₂ en la atmósfera

¹ En dendrocronología se conoce como profundidad de muestra de un período determinado al número de árboles que incluyen los anillos de crecimiento anual de dicho período (Ver inciso 3.5.1).

(1901-1950 y 1951-2000) indican que en general no existe diferencia significativa entre las medias en los índices de crecimiento de ambos períodos con excepción de la cronología de El Salto ($t = 0.001$), la cual durante el último siglo ha tenido un comportamiento inusual con respecto a las otras cuatro cronologías de la región.

4.4.4 Modelos de Regresión

Los modelos de regresión ajustados para predecir crecimiento en función del tiempo en los diferentes períodos considerados revelan resultados diferentes e incluso contradictorios entre las cronologías estudiadas. En dos de las cinco cronologías los coeficientes de regresión son positivos y estadísticamente significativos indicando un aumento en los índices de crecimiento durante las últimas décadas (El Salto $r^2 = 0.12$, $p < 0.02$; y Cerro Barajas $r^2 = 0.18$ y $p < 0.003$). En la cronología de Las Bayas el coeficiente de la regresión resultó significativo pero negativo, lo que indica una evidente disminución en el crecimiento en los últimos 50 años ($r^2 = 0.19$; $p < 0.001$). De hecho, un análisis de la tasa de cambio en diferentes períodos, muestra que la disminución en los índices de crecimiento en Las Bayas a partir de 1959 es la caída de crecimiento más pronunciada en los últimos 320 años, comparable únicamente con la caída registrada de 1680 a 1716 (Capítulo 3, Figura 3.5a). En las cronologías de Sierra de Valparaíso y Altos del Epazote no se detecta tendencia a cambio en los índices de crecimiento en el período 1951-2001. En dichas cronologías los modelos de regresión que predicen crecimiento en función del tiempo indican una tendencia a aumento en los índices de crecimiento durante los primeros 50

años de cada cronología (1800-1850 en Altos del Epazote y 1850-1900 en Sierra de Valparaíso). Esto podría deberse a que la primera parte de ambas cronologías está representada por una cantidad de muestras inadecuada.

La presencia de diferentes tendencias en los índices de crecimiento de las últimas décadas en las cronologías pueden interpretarse como respuestas a factores de orden local o como un aumento en la variación espacial del clima regional.

4.4.5 Análisis de Frecuencia de Años Indicadores

El análisis visual de las cronologías de los cinco sitios revela un evidente aumento en la variación de baja frecuencia, o interanual, durante las últimas tres décadas del siglo XX. El análisis de número de años con valores por arriba o por abajo de una desviación estándar en la cronología de Las Bayas, por ejemplo, refleja que el siglo XX es el que presenta mayor variación seguido por la parte del siglo XVII que se incluye en esta cronologías (Cuadro 4.1).

Período	- 1 SD	+1 SD	Total	%
1655-1700	4	13	17	37
1701-1800	20	13	33	33
1801-1900	18	13	31	31
1901-2000	22	19	41	41

Cuadro 4.1. Número de años con índices de crecimiento ± 1 desviación estándar en la cronología de Las Bayas.

Las últimas décadas del siglo XX son las que determinan la mayor frecuencia de valores extremos durante ese siglo, el crecimiento de uno de cada dos años a partir de 1971 tiene valores de 0.7 desviación estándar por abajo o por arriba de la media (Figura 4.2). El comportamiento mas variable de los índices de crecimiento durante los últimos 30 años en comparación con los tres siglos anteriores coincide con los resultados reportados por Stahle *et al.* (1998) para cronologías de la región subtropical de Norte América y de Indonesia, lo que éstos autores relacionan con los cambios detectados en la periodicidad de los fenómenos El Niño y La Niña. También coincide con las observaciones de Milly *et al.* (2002) quienes encontraron que 16 de las 21 grandes inundaciones ocurridas a partir de que iniciaron los registros climatológicos a principios de siglo, ocurrieron después de 1953 lo cual sería altamente improbable sin cambio climático.

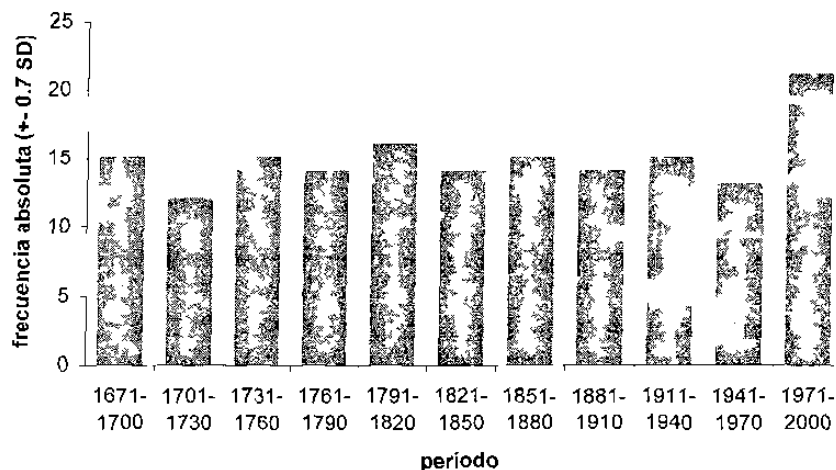


Figura 4.2. Número de años con índices de crecimiento ± 0.7 desviación estándar en la cronología de Las Bayas.

4.5 Conclusiones

Existen evidencias de que durante los últimos 50 años del siglo XX el comportamiento del crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental fue más variable con relación a los 150 años previos. Durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, las cinco cronologías analizadas tuvieron un comportamiento similar mientras que en la segunda mitad del siglo XX se observan patrones diferentes:

Los índices de crecimiento de dos de las cinco cronologías mostraron aumentos durante los últimos 50 años (período de aumento más acelerado de CO₂ en la atmósfera). Solo en una de ellas el aumento es evidente tanto en el análisis visual de los índices graficados, como en los resultados de los tres procedimientos estadísticos utilizados. En la otra, el aumento en el crecimiento solo se detecta mediante el análisis visual y mediante el ajuste de un modelo de regresión para predecir crecimiento en función de tiempo.

El aumento en el crecimiento de la primera resulta único en el período total que abarca la cronología (1702-1993), mientras que en la segunda, el aumento en los índices de crecimiento durante los últimos 50 años no parece diferente a aumentos que se han presentado antes en dicha cronología.

En otras dos de las cinco cronologías, no se encontraron evidencias de que los índices de crecimiento de los últimos 50 años muestren aumentos ni disminuciones diferentes a los observados durante períodos anteriores.

En una de las cinco cronologías se detectó un decremento en los índices de crecimiento de los últimos 50 años. Este decremento es evidente tanto en el análisis visual de dicha cronología como en los resultados de dos de los tres procedimientos estadísticos utilizados.

Las diferencias en el comportamiento de las cronologías durante las últimas décadas se interpretan como aumento en la variación espacial del clima regional. Durante el mismo período se detecta un aumento en la variación interanual del crecimiento en las cinco cronologías, misma que coincide con la alta variabilidad registrada en algunas estaciones meteorológicas de la región.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO ANUAL DE *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern. POSIBLE RESPUESTA A CAMBIO CLIMÁTICO

5.1 Resumen

Se exploró la posible asociación entre el crecimiento diámetro de *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern. en el Sur de Durango y el cambio climático. Se seleccionaron dos sitios en el límite superior y dos en el inferior de distribución altitudinal de la especie. Por primera vez se construyeron y se analizaron cronologías de esta especie endémica de la Sierra Madre Occidental con posible potencial dendroclimático. El análisis del crecimiento se realizó mediante dos métodos: (1) Análisis de tendencias en los índices de crecimiento; y (2) Comparación del incremento corriente anual en tres etapas de la vida de los árboles de diferentes clases de edad. Los resultados de ambos métodos indican diferentes grados de aumento en las tasas de crecimiento en el siglo XX. El incremento corriente anual de las tres edades consideradas aumentó con el tiempo, sin embargo, solamente en la edad menor (de los 15 a los 24 años) dicho aumento fue significativo. Los índices de crecimiento de todos los sitios muestran aumento y posterior disminución en los índices de crecimiento a partir de 1940. En concordancia con el aumento en la variabilidad climática durante

las últimas cuatro décadas del siglo XX, las cronologías de *P. lumholtzii* muestran una mayor variación interanual.

5.2 Introducción

El bosque templado es el tipo de vegetación más susceptible de desaparecer en México ante un escenario de cambio climático (Villers y Trejo 1997 y 1998). Dada la extracción selectiva de especies de estos bosques las áreas naturales sin disturbio que podrían utilizarse para el monitoreo de cambios en este tipo de vegetación son raras, y generalmente poco accesibles. El estudio de algunas especies como *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern., sin embargo podría constituir una buena alternativa. Esta especie, conocida comúnmente como “pino triste” por su fisonomía característica (Figura 5.1), es endémica de la Sierra Madre Occidental, por lo general ocupa sitios de suelo pobre y no tiene valor comercial (García & González 1998). Así es de suponer que sus poblaciones regularmente se encuentran menos alteradas por el impacto humano que las poblaciones de especies de importancia económica. Además, debido al suelo pobre en el que se desarrolla, el pino triste puede presentar mayor sensibilidad (reflejada en su crecimiento anual) a factores ambientales de origen natural como temperatura y precipitación. Debido a lo anterior, se considera que los estudios de esta especie pueden reflejar mejor la relación con los factores naturales que los estudios con especies de importancia económica en las que

las relaciones con los factores ambientales pueden estar enmascaradas por el efecto de manejo forestal.

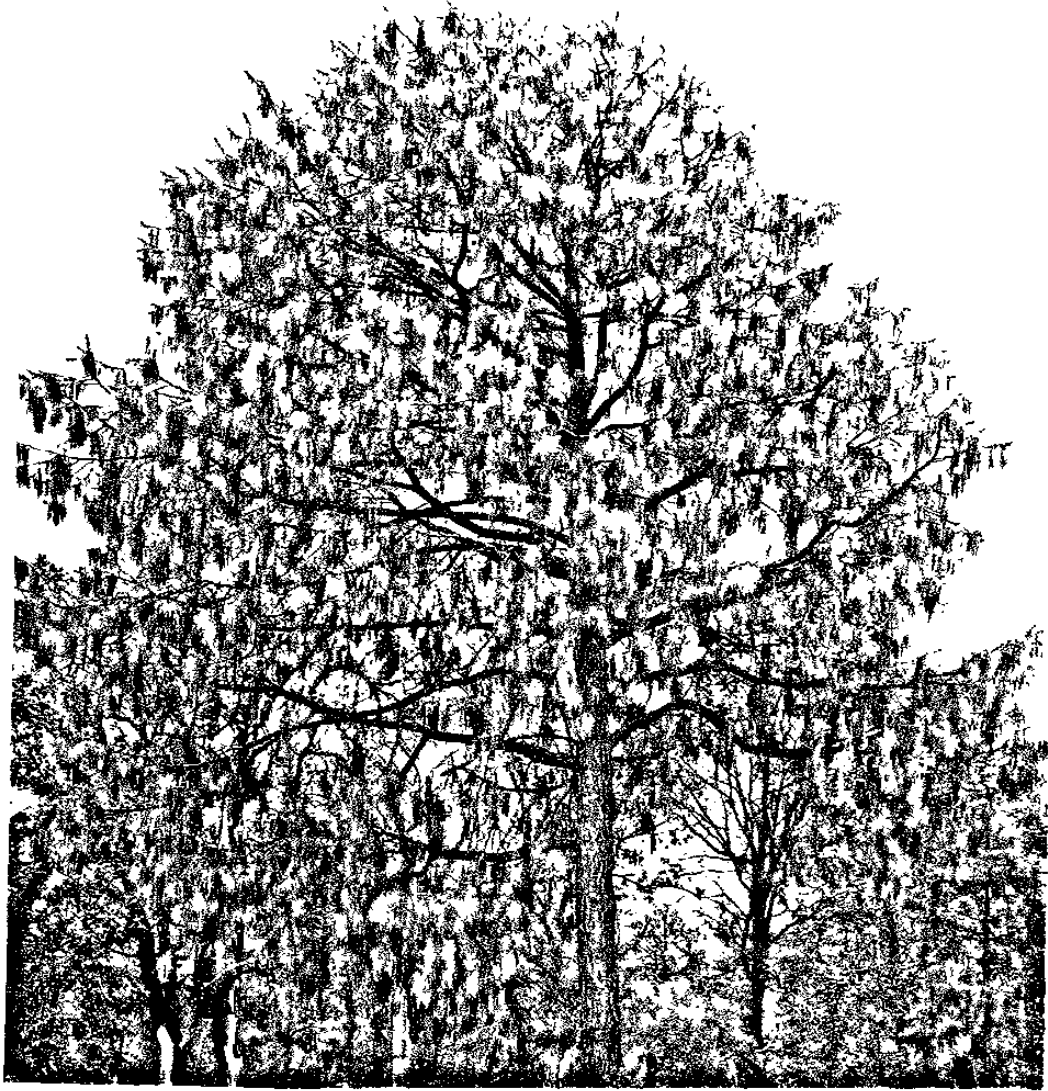


Figura 5.1. *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern.

5.2.1 Expectativas

Dada la distribución geográfica y altitudinal de *Pinus lumholtzii*, ante un escenario de cambio climático se esperaría detectar aumentos en el crecimiento coincidentes con el efecto fertilizante del CO₂, en las poblaciones ubicadas en el límite superior de su distribución altitudinal. Además se esperaría encontrar reducción gradual en el crecimiento de las poblaciones del límite inferior, según las predicciones sobre desplazamiento de la distribución altitudinal de las especies de bosque templado por efecto de aumento de temperatura. Ante un escenario de clima estable, en cambio, se esperaría encontrar estabilidad en los ritmos de crecimiento en ambas elevaciones.

Con el presente trabajo se pretende responder las siguientes preguntas: ¿El crecimiento radial de *Pinus lumholtzii* es igual en las poblaciones ubicadas en diferentes elevaciones? ¿Existen tendencias en el crecimiento radial de *Pinus lumholtzii* en el área de estudio que puedan relacionarse con cambio climático? ¿Los índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* muestran tendencias de cambio durante las últimas décadas?

5.2.2 Objetivos Particulares

Considerando poblaciones de *Pinus lumholtzii* del sur de Durango ubicadas en los límites superior e inferior de la distribución altitudinal de esta especie:

- a) Construir series de tiempo de crecimiento anual (cronologías), analizar y discutir su potencial dendroclimático y posibles tendencias en las mismas.

- b) Determinar y comparar el incremento corriente anual a edades específicas de las diferentes poblaciones.
- c) Determinar si el incremento corriente anual a edades específicas ha variado en los últimos siglos.

5.3 Área de Estudio

El trabajo de campo se realizó en la región Sur del estado de Durango que representa en general el área central de la distribución latitudinal de *P. lumholtzii*. Se seleccionaron dos sitios adyacentes al camino de la Cd. de Durango al aserradero La Flor (transecto La Flor o LF), y otros dos sitios sobre el camino de la cabecera municipal de El Mezquital al aserradero Los Charcos (transecto Mezquital o ME). Las poblaciones seleccionadas se ubican en los límites altitudinales superior e inferior, para la especie en cada transecto (Figura 5.2; Cuadro 5.1).

La vegetación natural en los sitios de estudio está dominada por *Pinus lumholtzii*, especie que comúnmente forma bosques abiertos en sitios con fuerte afloramiento de roca madre, o con pedregosidad superficial y escaso suelo por lo general ácido (García & González 1998).

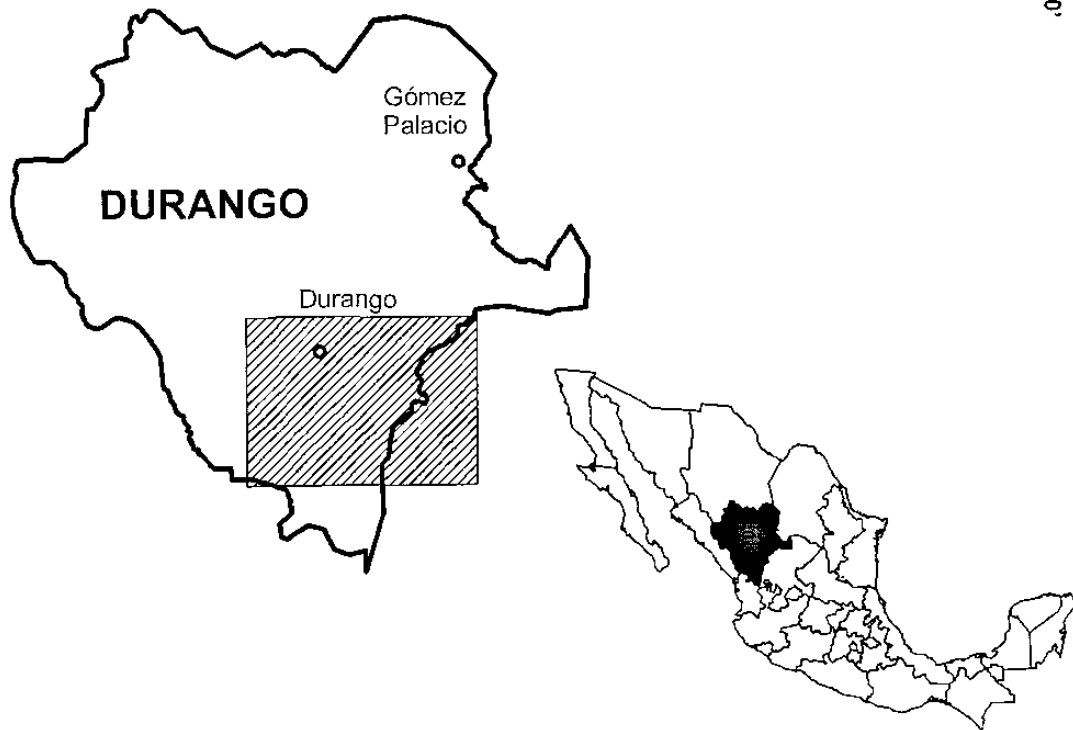
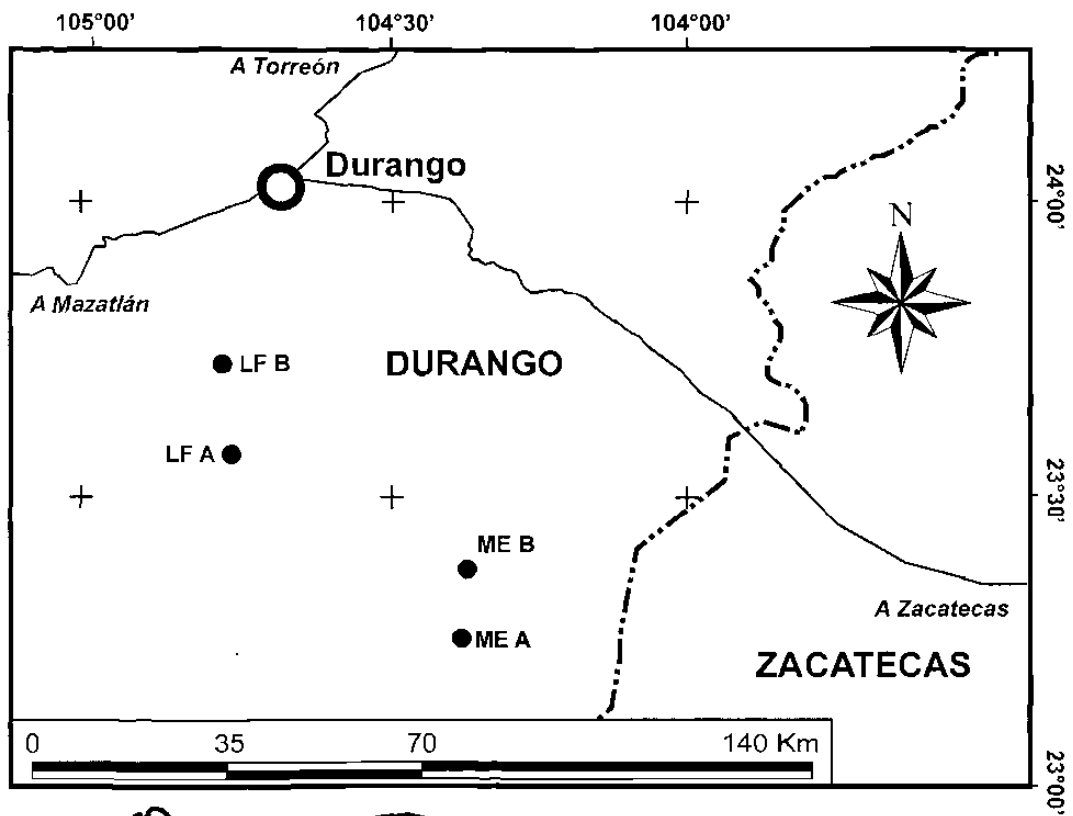


Figura 5.2. Área de estudio

Clave	Localidad	Coordenadas	Altitud (msnm)
LF B	Camino Durango – La Flor Alrededores de km 47	23°42'16" N, 104°44'20" W	2430
LF A	Camino Durango – La Flor Alrededores de km 55	23°37'41" N, 104°44'00" W	2700
ME B	Camino El Mezquital - Charcos Alrededores de km 25	23°22'42" N, 104°20'30" W	2400
ME A	Camino El Mezquital - Charcos La Cuesta Bca. (La Escondida)	23°16'53" y 104°20'46" W	2630

Cuadro 5.1. Ubicación geográfica de las cuatro poblaciones de *Pinus lumholtzii* estudiadas.

5.4 Metodología

5.4.1 Colecta y Procesamiento de Muestras

En cada una de las cuatro poblaciones se muestrearon 80 individuos de *Pinus lumholtzii* con un diámetro igual o mayor de 7.5 cm mediante 20 puntos del método de cuadrantes centrados en un punto (Cottam y Curtis 1956), técnica de muestreo de vegetación sin parcelas en la que en cada punto se seleccionan los individuos mas cercanos en cada uno de cuatro cuadrantes. Se obtuvieron dos núcleos de crecimiento (*virutas*) por árbol a una altura aproximada de 1.3 m. Las muestras se colectaron en dirección perpendicular a la pendiente del terreno con el fin de evitar la madera de reacción. Para transportarlas,

protegerlas y propiciar el secado, las muestras se colocaron en popotes transparentes debidamente etiquetados y con suficiente ventilación.

En laboratorio se procedió a preparar las muestras mediante las técnicas tradicionales en dendrocronología (Swetnam *et al.* 1985), una vez secas se montaron sobre molduras de madera y se pulieron con lijas sucesivamente de grano más fino para facilitar la observación de los anillos individuales (Figura 5.3).

5.4.2 Estimación de Edad y Fechado de las Muestras

Se realizó un conteo preliminar de anillos en todos los núcleos de crecimiento. Para estimar la edad de cada árbol se analizaron ambas virutas. En cada caso se seleccionó la de mayor cantidad de anillos y cuando ésta no había llegado hasta el centro del árbol se estimaron los anillos faltantes mediante un método geométrico:

$$\text{Anillos faltantes} = (D/P)/2$$

en donde:

D = Distancia entre los dos extremos del primer anillo incluido en la muestra.

P = Promedio del ancho de los siguientes cuatro anillos (medidos con micrómetro de objeto con una resolución de 0.1 mm).



Figura 5.3. Selección de árboles mediante la técnica de muestreo Cuadrantes centrados en un punto; colecta de núcleos de crecimiento y muestras de árboles establecidos en diferentes fechas.

El número de anillos presentes en la muestra y el número de anillos que se estimaron mediante la fórmula anterior se sumaron para estimar la edad de cada individuo a partir de su establecimiento. Considerando la altura de la muestra (1.3 m) como la altura de establecimiento. Para estimar con mayor precisión la edad se requeriría sumar, además, la cantidad de años que tarda el individuo para alcanzar la altura en que se tomó la muestra.

El número de anillos no es confiable para determinar la edad de un árbol. La edad estimada mediante el conteo se verificó, y en su caso se corrigió, mediante el fechado cruzado de las muestras. Para determinar el año calendario de formación de cada anillo de crecimiento primero se intentó utilizar el método de representaciones gráficas o *skeleton plots* (Stokes & Smiley 1968). Dicho método no funcionó debido a la gran cantidad de anillos falsos y de anillos perdidos detectados en las muestras de *Pinus lumholtzii*. Por lo tanto, para fechar los anillos de crecimiento e intentar de esa manera estimar con mayor precisión la edad de los individuos, se recurrió al método visual de sincronización de las muestras (Stokes & Smiley 1968) tomando como referencia anillos indicadores (generalmente los grandes) con el apoyo de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la región (ver capítulo 3).

La estimación final de la edad de cada individuo después de su establecimiento (a 1.3 m de altura) se obtuvo considerando:

Edad estimada = (Anillos presentes en la muestra + Anillos faltantes hacia el centro del árbol) + anillos perdidos – anillos falsos.

5.4.3 Medición de Anillos de Crecimiento Anual

Utilizando dendrómetro Velmex y software Medir (Krusic *et al.* 1996), se midió con una precisión de 0.01mm el ancho total de los anillos de crecimiento anual -madera temprana y madera tardía juntas- de 165 muestras que fue posible fechar así como de 20 muestras adicionales provenientes de árboles seniles que no fue posible fechar mediante las técnicas utilizadas.

5.4.4 Control de Calidad de los Datos y Obtención de Cronologías

Se utilizó el programa Cofecha (Holmes 1996) para verificar la calidad del fechado y de la medición de los anillos de crecimiento anual así como para estimar la edad de las 20 muestras medidas sin fechar. Se utilizó el programa Arstan (Cook 1996) para generar las cronologías de crecimiento anual de cada uno de los cuatro sitios de colecta. Para el proceso de eliminación de tendencias naturales en el crecimiento de los árboles individuales (estandarización) se utilizaron métodos conservadores como regresión lineal o exponencial negativa con el fin de remover la influencia de los procesos fisiológicos relacionados con la edad procurando conservar las variaciones de baja frecuencia relacionadas con posibles tendencias de cambio en factores ambientales. Los índices de crecimiento para cada serie se obtuvieron dividiendo el valor real de ancho del anillo entre el valor correspondiente en la curva, si el crecimiento real es igual o excede el valor estimado, el índice

generado será un valor igual o mayor de uno. Se promediaron los índices anuales de las series individuales obteniendo así la cronología correspondiente¹.

5.4.5 Análisis de Tendencias en el Crecimiento

Se buscaron posibles tendencias en el crecimiento mediante dos diferentes métodos: 1) análisis de índices de crecimiento ó cronologías; 2) comparación del incremento corriente anual a edades específicas de árboles pertenecientes a diferentes clases de edad.

5.4.5.1 Análisis de Índices de Crecimiento

Se elaboraron y se analizaron visualmente representaciones gráficas de las cronologías. Así mismo, para facilitar el análisis de las fluctuaciones en los índices de crecimiento, mediante la magnificación de las mismas, las cronologías se convirtieron a series de desviación estándar acumulada (Una descripción más precisa de este método se presenta en el inciso 4.3.) y se elaboraron representaciones gráficas de las mismas.

5.4.5.2 Análisis de Incremento Corriente Anual

Utilizando las series de tiempo de datos de crecimiento anual (ancho total de anillo medido en mm) de 185 árboles así como la estimación de la edad de cada individuo, se obtuvieron los valores del incremento corriente anual de cada

¹ Una descripción más amplia del proceso de control de calidad y generación de cronologías se presenta en el capítulo 3, incisos 3.4.4 y 3.4.5.

árbol en tres períodos de 10 años en su vida: de los 15 a los 24, de los 45 a los 54 y de los 75 a los 84 años después de su establecimiento. Se buscaron tendencias en el comportamiento del incremento corriente anual a través de los últimos dos siglos mediante análisis visual de los datos graficados. Así mismo, se obtuvieron, para cada sitio y para los cuatro sitios en conjunto, los valores de correlación r y la probabilidad de que r fuera igual a cero, entre el año de establecimiento de cada árbol y su incremento corriente anual a diferentes edades.

5.5 Resultados Y Discusión

5.5.1 Primeras Cronologías de *P. lumholtzii*

Con el uso de 36 a 47 series de crecimiento de ancho total de anillo por sitio (Apéndice A, Cuadros A6-A9) se construyeron cuatro cronologías para *Pinus lumholtzii* (Apéndice B, Cuadros B6-B9) del sur de Durango. Durante el trabajo de campo se colectaron un total de 30 árboles mayores de 200 años (11 mayores de 250). Sin embargo, el individuo más viejo fechado con precisión y considerado para la construcción de las cronologías tiene 216 años y se colectó en el sitio LF A, en donde se encontró el 50% (15) de los árboles mayores de 200 años. Las cronologías de los sitios de mayor elevación tanto en La Flor como en El Mezquital tienen una longitud media mayor que los sitios del límite inferior de distribución en cada caso. En comparación con las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Capítulo 3), especie considerada como de excelente

potencial dendrocronológico, las cuatro cronologías de *Pinus lumholtzii* obtenidas revelan una sensibilidad media aceptable (0.247-0.379); una intercorrelación baja (0.538 – 0.666); y presentan una mayor proporción de segmentos poco correlacionados con la cronología maestra (Cuadro 5.2). Todas las cronologías son mayores de 100 años, el período común entre las cuatro es de 1890 a 2001 (Figuras 5.4 y 5.5).

5.5.2 Potencial Dendroclimático de las Cronologías de *Pinus lumholtzii*

El análisis visual del comportamiento de las desviaciones estándar acumuladas de las cronologías de *Pinus lumholtzii* (Figuras 5.6 y 5.7) revela la mayor sensibilidad a las sequías de las dos cronologías del límite inferior de distribución las cuales registran las tres grandes sequías del siglo XX: sequía de los 1920's, sequía de los 1950's y sequía de los 1990's. Las cronologías del límite superior de distribución, en cambio, parecen haber sido poco afectadas por la sequía de los 1920's, y prácticamente no afectadas por la de los 1950's y la de los 1990's. Esto coincide con observaciones de Návar (com. pers.) para el noreste del país acerca de que parece existir un límite altitudinal para las sequías y es una muestra del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* como registro de clima regional.

	LF A 2700 m	LF B 2430 m	ME A 2630 m	ME B 2400 m
Series fechadas	47	37	36	38
Primer año	1787	1830	1811	1890
Ultimo año	2002	2001	2002	2002
Período (años)	216	172	192	113
Anillos medidos	4294	3265	3302	2051
Anillos perdidos	5	1	3	7
Segmentos (posibles errores)	177 (3)	137 (11)	135 (16)	80 (1)
Intercorrelación	0.656	0.538	0.591	0.666
Sensibilidad media	0.312	0.247	0.293	0.379
Longitud media (años)	91.4	88.2	91.7	54
Autocorrelación 1 ^{er} . ord.	0.538	0.597	0.493	0.380

Cuadro 5.2. Resumen comparativo de los resultados de Cofecha y de Arstan (estadísticas descriptivas) para los datos de ancho total de anillo de las series de crecimiento anual de *Pinus lumholtzii* de los cuatro sitios de estudio.

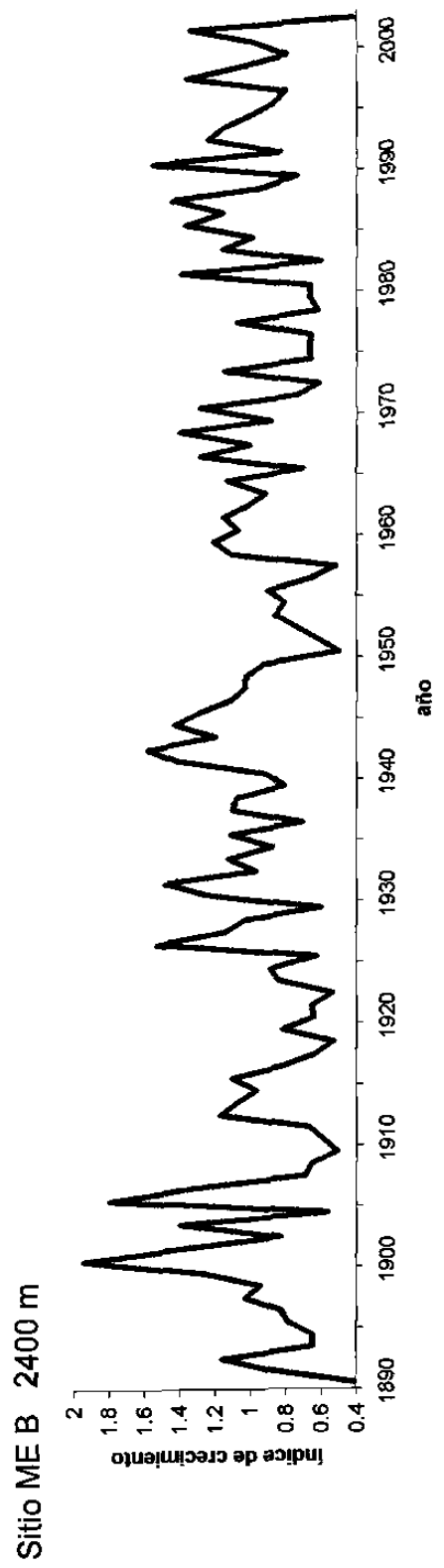
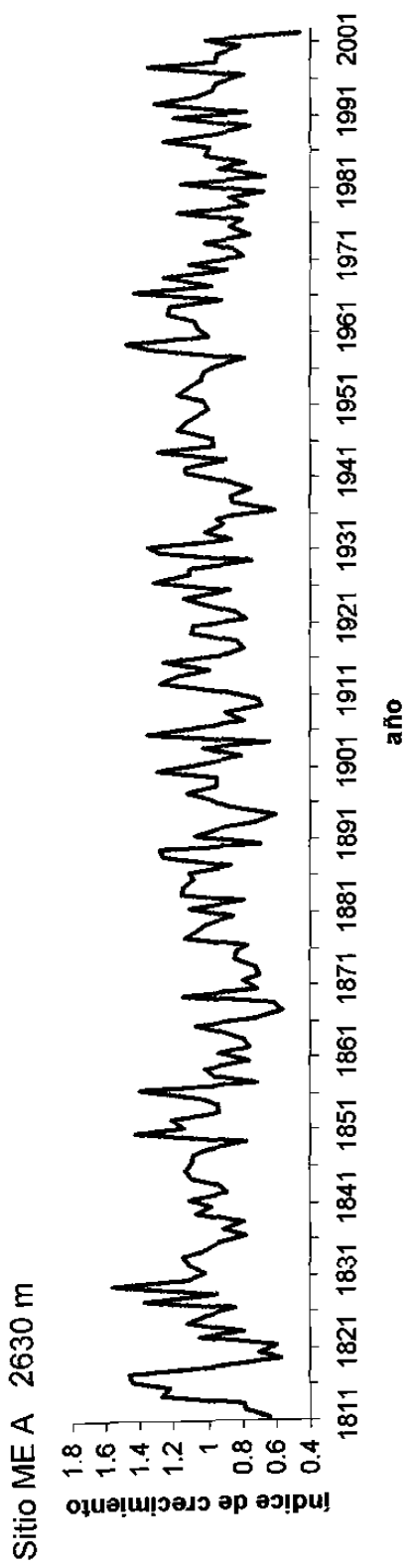


Figura 5.4 Índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* en los límites superior e inferior de distribución en el transecto de El Mezquital a Los Charcos en el sur de Durango.

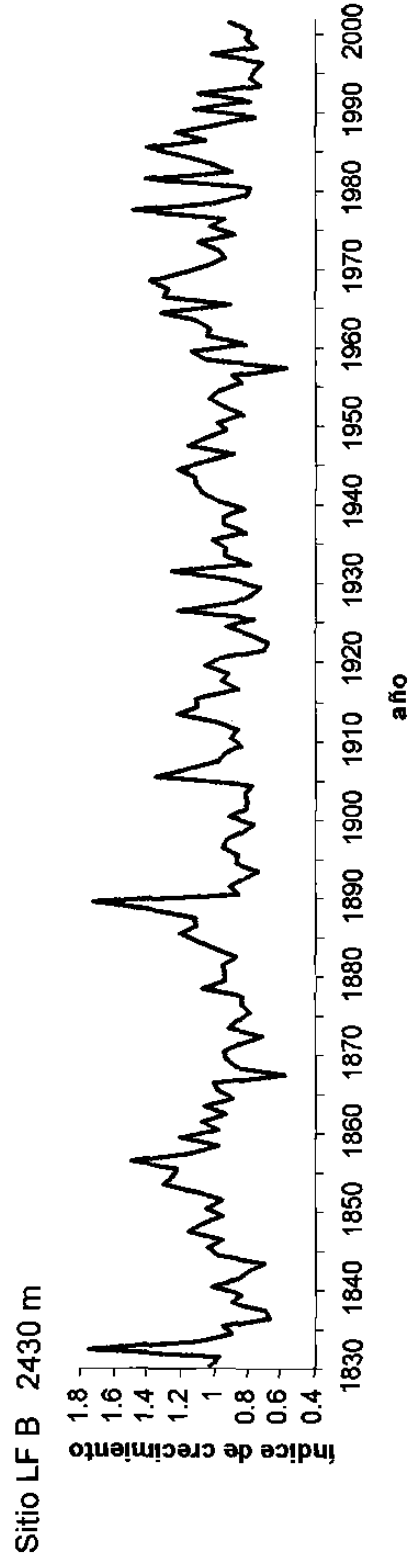
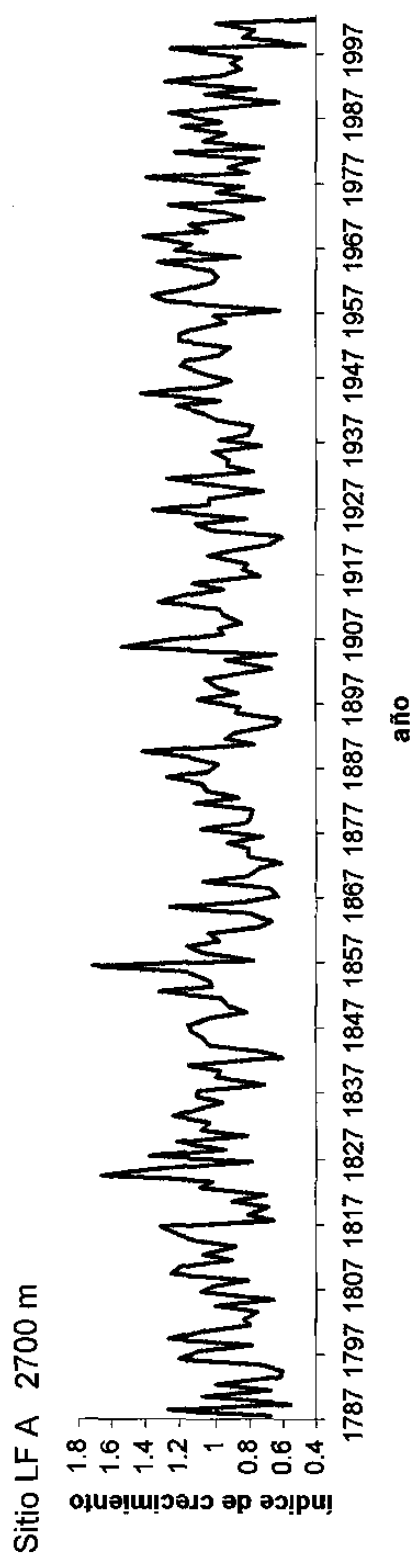


Figura 5.5 Índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* en los límites superior e inferior de distribución en el transecto Durango-La Flor, en el sur de Durango.

Las cronologías de *Pinus lumholtzii* parecen tener potencial para registrar variaciones climáticas tanto de orden regional como local. Además de que las dos cronologías del límite inferior de distribución reflejan sequías de orden regional (Figuras 5.4 y 5.5); las dos cronologías del transecto de El Mezquital coinciden en una caída en el crecimiento en la década de los 1970's (Figura 5.4) que debe estar relacionada con algún evento del clima local en dicho transecto y que afectó por lo menos desde los 2400 a los 2630 m de elevación.

5.5.3 Análisis Visual de las Cronologías de *Pinus lumholtzii*

Al igual que en las cronologías de *Pseudotsuga* (Capítulo 3) el análisis visual de las cuatro cronologías de *P. lumholtzii* (Figuras 5.4 y 5.5) no muestra tendencias evidentes de aumento o disminución en los índices de crecimiento durante las últimas décadas que sean diferentes a las de los siglos anteriores. Al igual que para las cronologías de *Pseudotsuga*, en las de *P. lumholtzii* es evidente un aumento en la variación de alta frecuencia durante las últimas cuatro décadas, aproximadamente a partir de 1964. Este aumento en la frecuencia de valores extremos se presenta en las cuatro cronologías pero es más notorio en las poblaciones del límite superior de distribución, en las cuales además parece haber una caída en los índices de crecimiento en las últimas décadas. En el caso de LF A el índice de crecimiento anual de 1998 es el valor negativo más extremo de los últimos dos siglos.

En las poblaciones del límite inferior, en cambio, no se observa coincidencia entre las caídas en los índices de crecimiento. En LF B se aprecia una caída

mas reciente (a partir de 1985) mientras que en ME B las caídas que se observan son anteriores a 1964.

5.5.4 Análisis de los Valores Z Acumulativos

El análisis visual comparativo de los valores Z, unidades de desviación estándar, acumulados de los índices de crecimiento en cada uno de los sitios de estudio (Figuras 5.6 y 5.7) manifiesta:

(i) En ambas poblaciones del límite superior (ME A y LF A) se observan patrones similares con una tendencia positiva desde 1940 hasta 1973 aproximadamente cuando el crecimiento en LF A entra en una fase de estabilidad y en ME A se presenta un decremento del mismo que inicia en los años 70's y continúa hasta los 90's. (ii) Las dos poblaciones del límite inferior de distribución (ME B y LF B) también muestran un ascenso en los índices de crecimiento a partir de 1940. Sin embargo, a diferencia de las poblaciones del límite superior, ambas poblaciones del límite inferior parecen haber sido seriamente afectadas por la sequía registrada a mediados del siglo XX (los 50's). (iii) Después de 1960 los índices de crecimiento de ambas poblaciones del límite inferior (LF B y ME B) se recuperaron por un corto período para posteriormente volver a decaer. (iv) Se detectó un cambio en los ritmos de crecimiento de las poblaciones a diferente altitud en la década de los 50's, durante la sequía. Mientras que hasta entonces las poblaciones en el límite inferior tenían mejores índices de crecimiento, a partir de la década de los 50's, cuando las inferiores parecen haber sido afectadas por la sequía, las

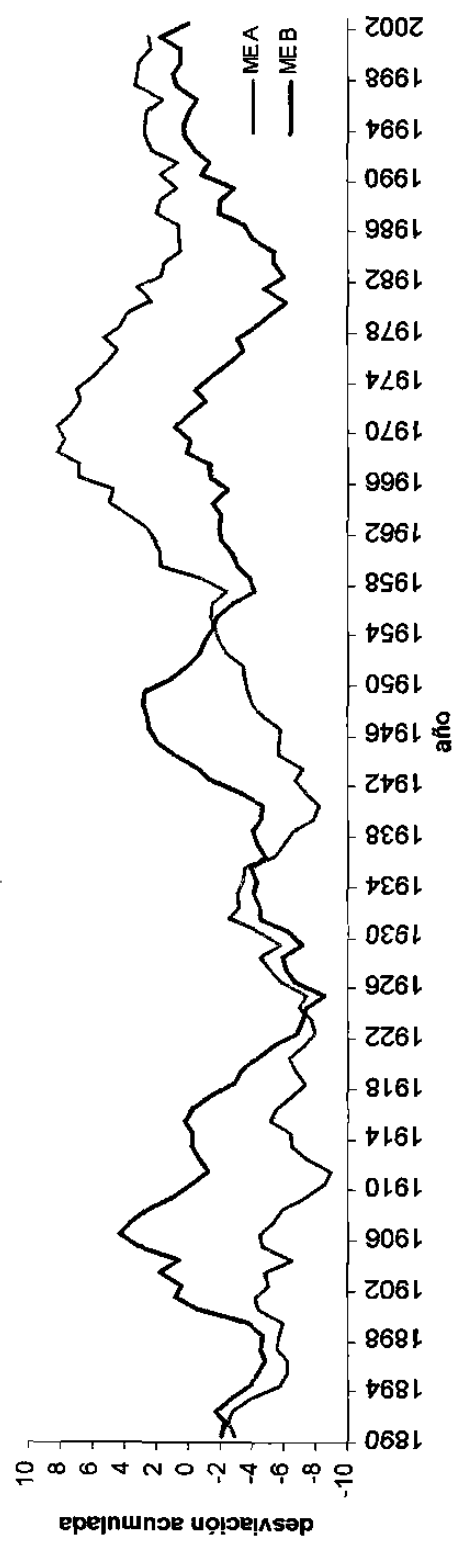
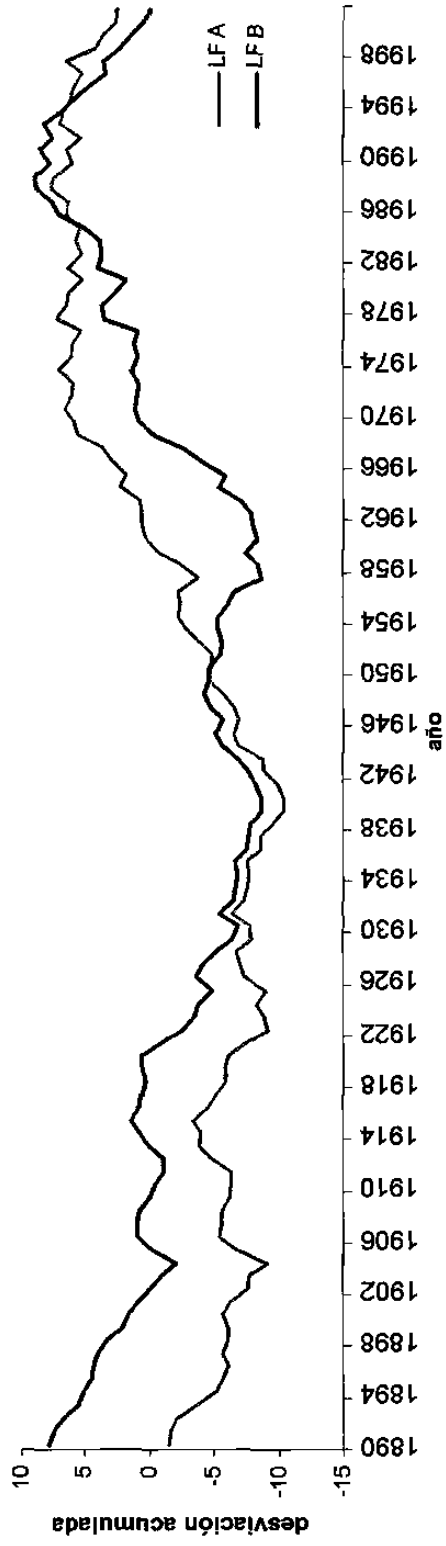


Figura 5.6. Unidades de desviación estándar acumulados de las cronologías del límite superior e inferior de distribución en el transecto de El Mezquital a Los Charcos.

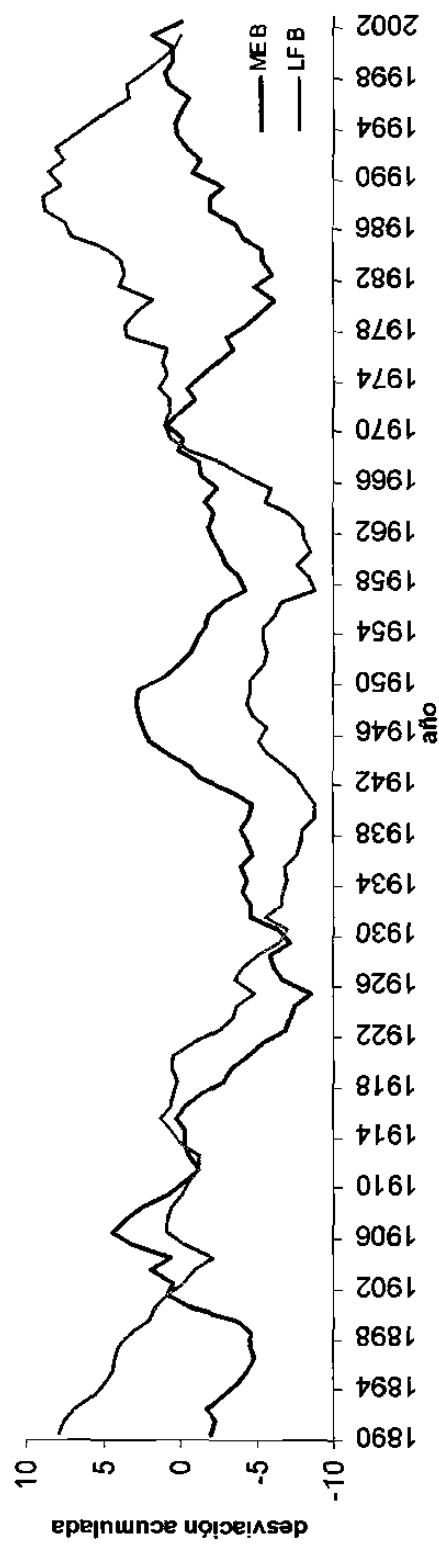
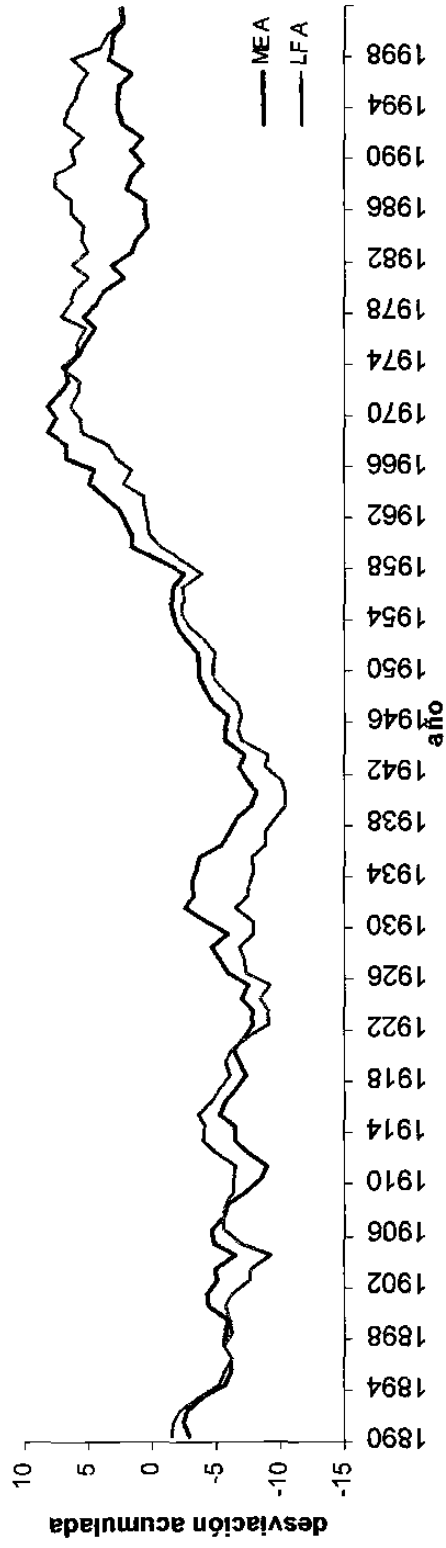


Figura 5.7. Unidades de desviación estándar acumuladas de las cronologías del límite superior (arriba) e inferior (abajo) de distribución en dos transectos en el sur de Durango.

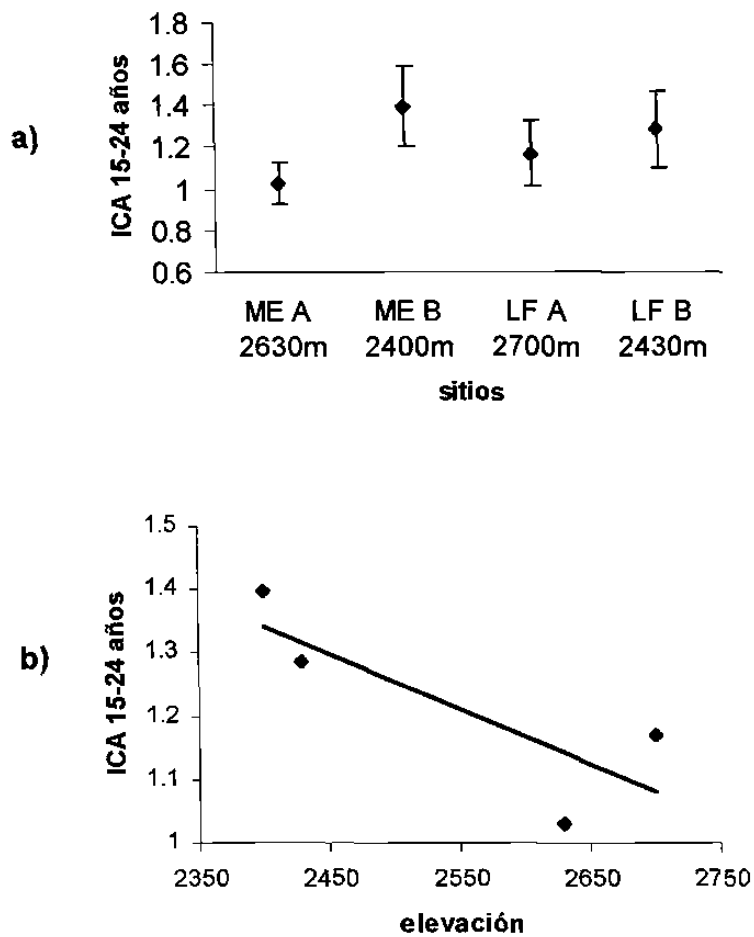


Figura 5.8. Promedios de incremento corriente anual de *Pinus lumholtzii* en cuatro poblaciones del Sur de Durango. 15 a 24 años después del establecimiento. a) Promedio e intervalos de confianza por sitio. b) Promedio por elevación.

poblaciones superiores empezaron a tener mejores índices de crecimientos que las inferiores.

El cambio en los ritmos de crecimiento de las poblaciones a diferente altitud coincide con la hipótesis general de este trabajo en la que se esperan aumentos en las tasas de crecimiento en el límite superior y posibles disminuciones en el límite inferior. Sin embargo, el análisis del comportamiento de las cronologías muestra evidencias de que dichos cambios pueden estar relacionados con la sequía de mediados del siglo XX. Las poblaciones del límite inferior (LF B y ME B) fueron afectadas por dicha sequía (Figuras 5.6 y 5.7), la cual siguió afectando el crecimiento de manera negativa en los años posteriores.

5.5.5 Comparación Espacial del Incremento Corriente Anual

La comparación visual de los promedios de incremento corriente anual de los cuatro sitios de estudio (Cuadro 5.3, Figura 5.8) indica que éste es ligeramente mayor en las poblaciones ubicadas en el límite inferior de distribución ya que los promedios de crecimiento en éstas están por arriba de la media, mientras que el incremento corriente anual de las poblaciones de altitudes mayores es menor a la media en las tres edades consideradas. La gráfica de las medias e intervalos de confianza (95%) (Figura 5.8a) refleja que las diferencias en el incremento corriente anual entre las poblaciones de altitudes extremas es más evidente entre las dos poblaciones del transecto El Mezquital. Esto podría relacionarse con factores intrínsecos de los sitios –como densidad y suelo- ya que la

diferencia en elevación entre éstos es incluso ligeramente menor a la diferencia entre los sitios del transecto La Flor cuyo incremento corriente anual difiere menos entre sí.

Edad (años)	ME A 2630 m	ME B 2400 m	LF A 2700 m	LF B 2430 m	PROMEDIO
ICA 15-24	1.03	1.42	1.17	1.29	1.23
ICA 45-54	0.91	1.14	1.03	1.18	1.06
ICA 75-84	0.71	1.04	0.84	0.94	0.88

Cuadro 5.3 Incremento corriente anual de *Pinus lumholtzii* en tres edades diferentes de cuatro localidades del Sur de Durango.

La diferencia en el incremento corriente anual en las dos altitudes consideradas (Fig. 5.8 b) podría relacionarse con diferencias en temperatura lo que haría de *Pinus lumholtzii* una especie con buena posibilidad de permanecer en el área de estudio, mediante su desplazamiento hacia mayores elevaciones, ante un escenario de aumento de temperatura.

5.5.6 Comparación Temporal del Incremento Corriente Anual

En las cuatro poblaciones estudiadas la correlación entre el incremento corriente anual y el año de establecimiento muestra valores positivos. Sin embargo, solamente en la población ubicada en el límite inferior de distribución

del transecto La Flor (LF B) dicha correlación resultó estadísticamente significativa ($r = 0.45$ $p < 0.006$ y $r = 0.44$, $p < 0.01$ a los 15 y a los 45 años respectivamente). Esto indica que por lo menos en dicha población el incremento corriente anual de *Pinus lumholtzii* a los 15 y a los 45 años es mayor entre mas joven sea el individuo y que en las otras tres poblaciones, aunque la tendencia no es significativa, tampoco hay evidencias de que sea contraria.

Estos resultados, aunque poco evidentes, coinciden con la hipótesis de este trabajo sobre cambio en las tasas de crecimiento. Sin embargo difieren en cuanto a las poblaciones en que según esta hipótesis dichos cambios se presentarían de manera más evidente. Se esperaba encontrar aumentos en el incremento corriente anual en los sitios de mayor altitud (ME A y LF A) y estabilidad o disminución en las poblaciones ubicadas en el límite inferior de distribución (LF B y ME B).

En cada uno de los cuatro sitios, los valores mas altos de correlación (r) entre el crecimiento corriente anual y el año de establecimiento se presentan en el caso del incremento corriente anual de los 15 a los 24 años de edad y los más bajos de los 75 a los 84 años de edad. Lo mismo sucede al considerar los cuatro sitios en conjunto (Fig. 5.9 a-c). La correlación entre el incremento corriente anual y el año de establecimiento es mayor, y estadísticamente significativa, de los 15 a los 24 años ($r = 0.19$, $p < 0.02$) mientras que de los 45 a 54 y de los 75 a los 85 años la correlación no se presenta ($r = 0.17$, $p < 0.07$ y $r = 0.11$, $p < 0.27$).

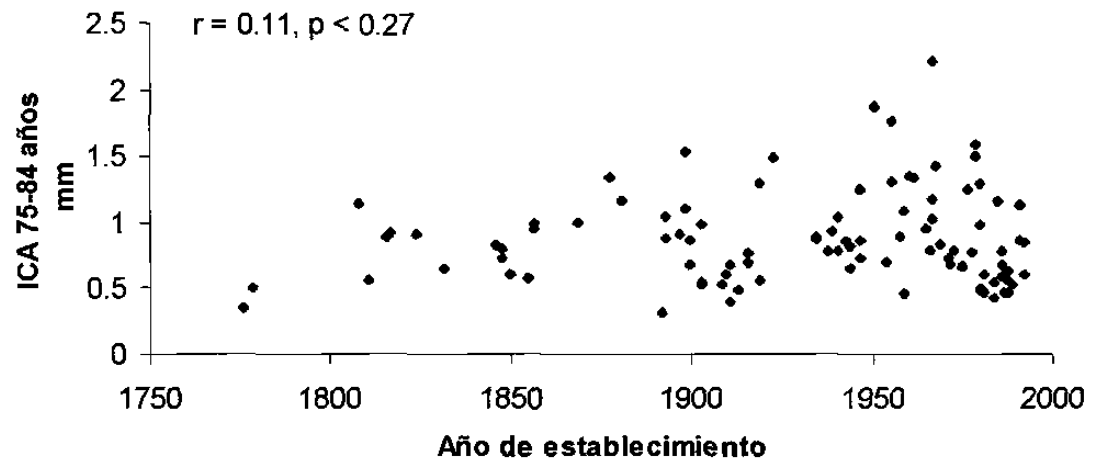
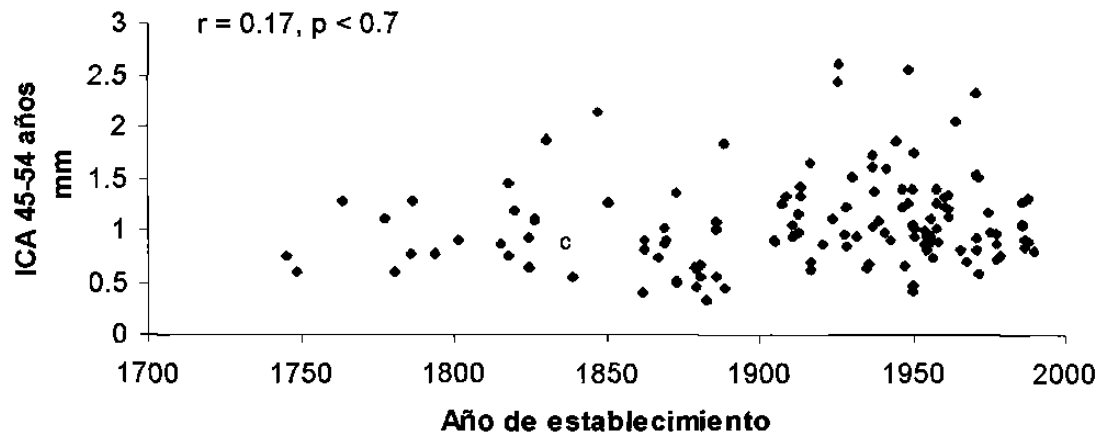
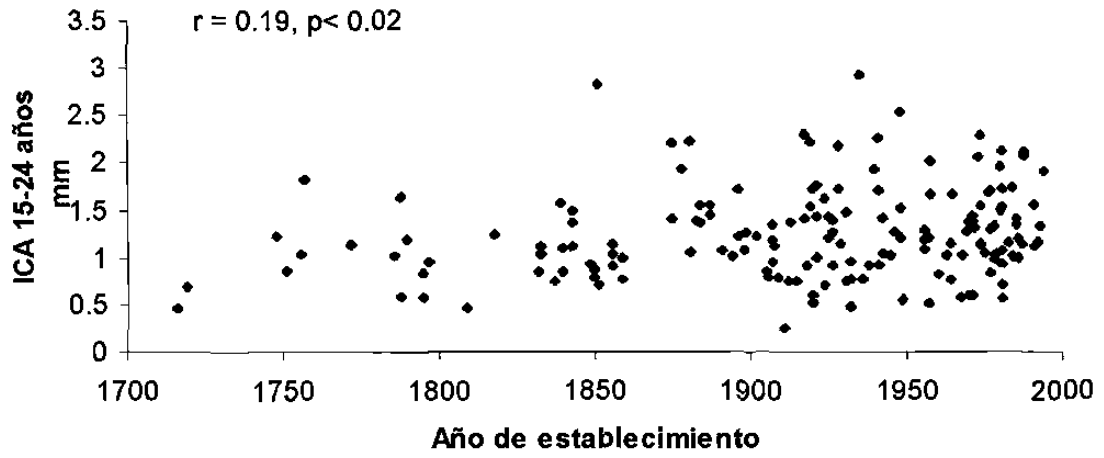


Figura 5.9 Crecimiento corriente anual de *Pinus lumholtzii* en el sur de Durango durante los últimos tres siglos: a) 15 a 24 años; b) 45 a 54 años; c) 75 a 84.

Esto puede significar que los árboles jóvenes son más sensibles que los maduros a los cambios ambientales, lo que coincide con varios reportes internacionales sobre mayor captura de carbono por árboles jóvenes que por árboles maduros.

En las figuras 5.9 a-c se muestra el incremento corriente anual (mm) en tres edades diferentes del total de árboles muestreados en las cuatro poblaciones. En general se aprecian mayores incrementos corrientes anuales en los árboles más jóvenes. En las tres gráficas se aprecia una menor proporción de individuos seniles (establecidos durante el siglo XVIII y principios del XIX). Los crecimientos relativamente pobres de los árboles seniles determinan una ligera tendencia positiva en la nube de puntos que interpretamos como aumento en el incremento corriente anual. Sin embargo (i) solamente el aumento en el ICA de los 15 a los 24 años es estadísticamente significativo; (ii) entre los individuos establecidos a partir de mediados del siglo XIX no existe ninguna tendencia en el crecimiento corriente anual; (iii) entre los individuos establecidos en dicho período son relativamente pocos los que muestran valores de crecimiento corriente anual mayores a los observados en los individuos seniles.

De lo anterior es posible que: (i) el aumento en incremento corriente anual solamente se refleje en árboles jóvenes; (ii) el aumento en incremento corriente anual se presentó hace más de 150 años (antes de la revolución industrial y cambio climático) y después de esto casi no ha variado; (iii) los individuos más

viejos que se muestrearon son árboles que crecieron muy despacio en comparación con los de su generación.

5.6 Conclusiones

Se obtuvieron por primera vez cronologías para *Pinus lumholtzii*. De acuerdo a nuestras expectativas, esta especie parece tener buen potencial para estudios ecológicos y dendroclimáticos ya que: (i) por carecer de importancia económica sus poblaciones tienen menos disturbio humano, (ii) regularmente se desarrolla sobre suelo somero lo que potencialmente le confiere mayor sensibilidad a factores climáticos, (iii) alcanza edades de mas de 300 años, (iv) es posible determinar los años de formación de los anillos individuales, y (v) sus cronologías reflejan variaciones climáticas de orden local y regional.

El análisis de los índices de crecimiento y de las unidades de desviación estándar de los mismos indica aumento en la tasa de crecimiento de las cuatro poblaciones a partir de 1940. Este aumento en las tasas de crecimiento se sostiene en las poblaciones del límite superior hasta principios de los 1970's, mientras que en las poblaciones del límite inferior se interrumpe en la década de los 1950's.

En la década de los 50's, durante la sequía, se detecta un cambio en los ritmos de crecimiento de las poblaciones a diferente altitud lo cual coincide con la

hipótesis de este trabajo en la que se esperan aumentos en las tasas de crecimiento en el límite superior y posibles disminuciones en el límite inferior.

Las últimas cuatro décadas de las cronologías de *P. lumholtzii* reflejan la mayor variación de alta frecuencia de los últimos 200 años lo que coincide con la alta variabilidad climática registrada en el mismo período según la literatura internacional.

El incremento corriente anual de *Pinus lumholtzii* en el área de estudio es mayor en las poblaciones ubicadas en su límite inferior que en el superior de su distribución altitudinal. Esto concuerda con los resultados esperados y avala la metodología utilizada en la medición.

El incremento corriente anual de *Pinus lumholtzii* parece haber aumentado muy ligeramente durante los últimos 250 años. Dicho aumento es significativo en el período 15 - 24, mientras que en los 45 - 54 y 75 - 84 no resulta significativo.

El incremento corriente anual aumentó significativamente sólo en una de cuatro poblaciones. La ausencia de un patrón altitudinal relacionado puede obedecer a factores locales.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pinus* spp. EN EL SUR DE DURANGO

6.1 Resumen

Con el fin de determinar la presencia de aumentos en las tasas de crecimiento que coincidan con el efecto fertilizante del CO₂ atmosférico se analizó el crecimiento radial de cuatro especies de *Pinus* en el sur del estado de Durango: *P. durangensis* Martínez, *P. cooperi* C.E. Blanco, *P. engelmannii* Carr. y *P. lumholtzii* Rob. & Fern. Se estimó el radio alcanzado por cada especie a dos edades diferentes (entre 15 y 60 años), se elaboraron gráficas y se obtuvieron los coeficientes de correlación entre la edad absoluta de los árboles y el radio alcanzado a edades determinadas. Se encontraron evidencias de aumento significativo en el crecimiento radial de tres de las cuatro especies. Dicho aumento es más significativo en el caso de las especies de mayor importancia económica (*P. cooperi* y *P. durangensis*) lo que sugiere que podría estar relacionado, con una posible disminución en la densidad de los rodales por el efecto de extracciones selectivas. El aumento en las tasas de crecimiento de *P. lumholtzii* es menor, es significativo solo en una de cuatro poblaciones, y solo para muestras que incluyan tanto árboles jóvenes como árboles de más de 160

años. Esto sugiere por un lado relación con factores locales y por otro lado aumento súbito (no gradual) del crecimiento a mediados del siglo XIX. Se especula sobre el origen de la tendencia en el crecimiento determinada por los escasos árboles viejos disponibles en las muestras de las cuatro especies.

6.2 Introducción

Se estima que el efecto fertilizante de las crecientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera podría incrementar la productividad y las tasas de crecimiento de los bosques (Bazzaz *et al.* 1996). Dicho efecto se ha registrado en diferentes partes del mundo mediante diversos estudios bajo condiciones controladas, generalmente con plántulas o con individuos juveniles (Curtis 1998). Algunos estudios de campo han registrado aumentos en las tasas de crecimiento que podrían o no estar relacionados con el efecto fertilizante del CO₂ (La Marche 1984; Graybill & Idso 1993; Nicolussi *et al.* 1995; D'Arrigo & Jacoby 1993). Como una aproximación preliminar al estudio de los posibles cambios en el crecimiento de los bosques templados de México, se utilizaron algunos datos disponibles sobre crecimiento para buscar tendencias en el crecimiento de tres especies de *Pinus* en el sur del estado de Durango: *P. durangensis* Martínez, *P. cooperi* C.E. Blanco y *P. engelmannii* Carr. Los resultados obtenidos se compararon posteriormente con los obtenidos de un análisis similar con *P. lumholtzii* Rob. & Fern. con base en series de tiempo de ancho total de anillo.

Objetivo. Determinar si existen tendencias de aumento en el crecimiento radial en cada una de las cuatro especies de *Pinus* que puedan interpretarse como posible respuesta al efecto fertilizante del aumento de CO₂ en la atmósfera.

6.3 Metodología

Utilizando una base de datos de análisis troncal de la región sur de Durango basada en trabajo de campo (Corral-Rivas 1999) se obtuvieron datos sobre crecimiento radial de 41 individuos de *P. cooperi* (de 47 a 159 años de edad), 36 de *P. durangensis* (de 48 a 143 años de edad), y 31 de *P. engelmannii* (de 37 a 119 años de edad). Para cada especie se estimó el radio alcanzado a dos edades diferentes (entre 15 y 60 años) de acuerdo a las posibilidades de los datos de crecimiento multianual disponibles en la base de datos.

En el caso de *P. lumholtzii* se colectaron dos núcleos de crecimiento de un total de 320 árboles adultos de diferentes edades mediante el muestreo de cuadrantes centrados en un punto (Cottam y Curtis 1956) en cuatro diferentes localidades del sur de Durango¹. Después de estimar la edad² se eliminaron de esta muestra 105 individuos menores de 40 años considerándose para este estudio un total de 215 individuos de entre 42 y 330 años de edad.

¹ Descripción de área de estudio en capítulo 5, inciso 5.3.

² Descripción del proceso de estimación de edad en capítulo 5 inciso 5.4.2

En una sola de las muestras de cada árbol se estimó el incremento radial acumulado a los 40 y a los 60 años de edad midiendo la distancia entre el centro de la muestra y el final de los anillos respectivos con el auxilio de un micrómetro de objeto con una resolución de 0.1mm. Para las muestras que carecían de centro, la medición consideró ambos extremos del primer anillo con el fin de compensar la falta de los primeros anillos.

Con el fin de detectar posibles cambios en las tendencias de sus tasas de crecimiento, se elaboraron gráficas de dispersión de puntos con los datos de edad total de los árboles en el eje de las abscisas, y con los datos sobre el radio alcanzado a determinada edad en el eje de las ordenadas. Se obtuvieron los coeficientes de correlación entre ambos conjuntos de datos para las cuatro especies, a diferentes edades. En el caso de *P. lumholtzii* también se obtuvieron los coeficientes de correlación de muestras parciales por sitio y por edad.

La correlación negativa entre edad absoluta y radio a edades determinadas se consideró evidencia indirecta de aumento en las tasas de crecimiento radial durante el periodo abarcado por el rango de edad de la muestra.

6.4 Resultados y Discusión

Se encontraron posibles evidencias de aumento en el crecimiento radial de las cuatro especies de *Pinus* estudiadas. En todas se observó una correlación

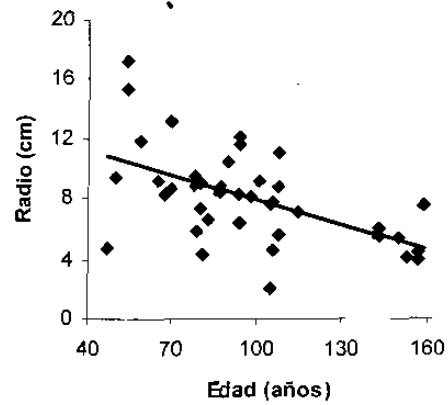
negativa entre la edad del árbol y el crecimiento radial a diferentes edades (Cuadro 6.1, Figuras 6.1 y 6.2). Solamente en el caso de *P. engelmannii* (tanto a los 30 como a los 60 años) y en *P. durangensis* (solamente a los 15 años), dicha tendencia no resultó estadísticamente significativa.

Estos resultados sugieren que los individuos jóvenes parecen estar alcanzando diámetros mayores que los alcanzados por los individuos mas viejos cuando eran jóvenes (Figuras 6.1 a-c y 6.2).

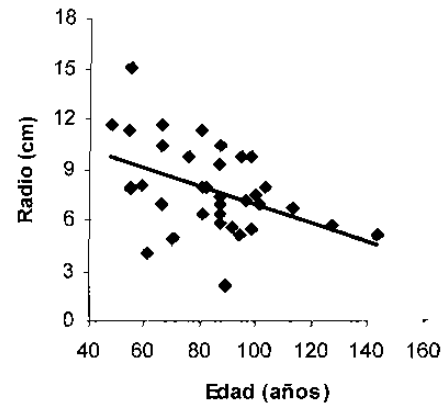
Especie	Edad	Coef. Corr.	p <
<i>P. cooperi</i>	30	-0.55	0.0002
	45	-0.58	0.00007
<i>P. durangensis</i>	15	-0.42	0.17
	30	-0.45	0.006
<i>P. engelmannii</i>	30	-0.30	0.10
	60	-0.28	0.14
<i>P. lumholtzii</i>	40	-0.15	0.004
	60	-0.23	0.003

Cuadro 6.1. Coeficientes de correlación (r) entre la edad total de los individuos y su incremento radial a diferentes edades.

(a)
Pinus cooperi
 $r = -0.55$
 $p < 0.0002$



(b)
Pinus durangensis
 $r = -0.45$
 $p < 0.006$



(c)
Pinus engelmannii
 $r = -0.30$
 $p < 0.10$

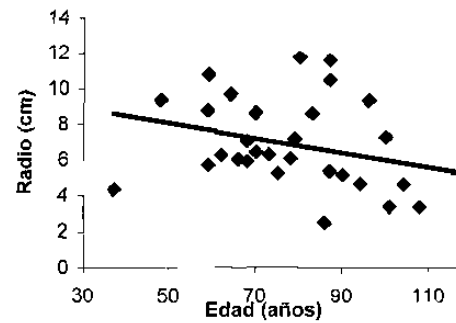


Fig. 6.1. Crecimiento radial alcanzado a los 30 años de edad por: a) 41 individuos de *Pinus cooperi* de 47 a 159 años de edad al momento del muestreo; b) 36 individuos de *Pinus durangensis* de 48 a 165 años de edad al momento del muestreo; y c) 31 individuos de *Pinus engelmannii* de 37 a 119 años de edad al momento del muestreo (1998).

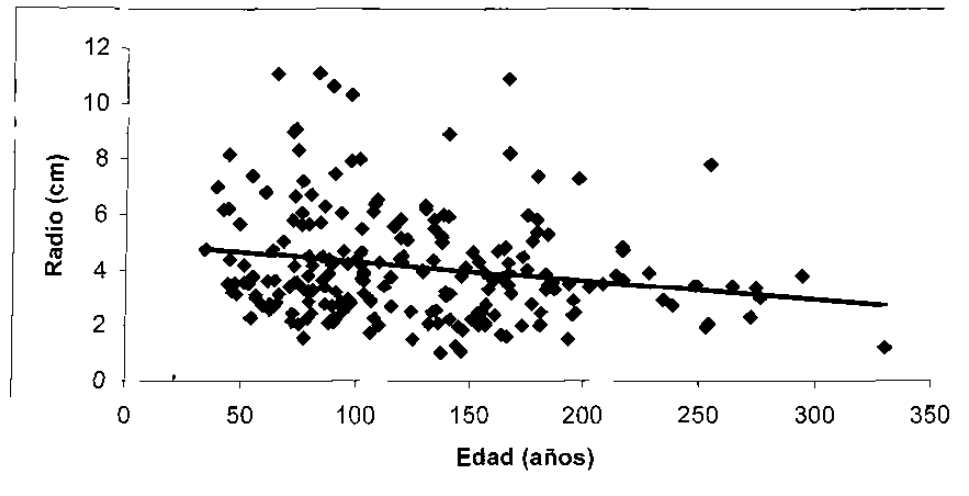


Figura 6.2. Crecimiento radial alcanzado a los 40 años de edad por 215 individuos de *Pinus lumholtzii* de 42 a 330 años de edad al momento del muestreo (2001-2002).

Los resultados de este análisis parecen concordar con las predicciones sobre el efecto fertilizante del CO_2 en la atmósfera. Sin embargo, (i) las dos especies en las que aparentemente existen mayores aumentos en las tasas de crecimiento (*P. cooperi* y *P. durangensis*), son dos de las especies de mayor importancia económica en la región y sus poblaciones han sido sometidas a extracciones continuas por lo menos desde principios del siglo XX lo cual causa una disminución en su densidad. Lo anterior puede resultar en mayores incrementos en diámetro de los individuos remanentes; (ii) *P. lumholtzii*, en cambio, especie con mínimo valor comercial y que además se muestreó más intensivamente, muestra las tendencias más débiles, lo que indica que la tasa de crecimiento de esta especie ha cambiado menos que las demás.

La tendencia hacia mayores crecimientos en *P. lumholtzii* parece estar determinada por un aumento en el crecimiento medio a mediados del siglo XIX. Esto se presume dados los rangos de edad en que los que la tendencia negativa entre la edad y el crecimiento radial es significativa: Tanto entre los individuos menores de 120 años como entre los mayores de 150, la tendencia de aumento en crecimiento no es significativa ($n = 115$, $r = -0.06$, $p < 0.53$; y $n = 68$, $r = -0.11$, $p < 0.38$ respectivamente); entre los individuos menores de 160 años la tendencia negativa entre la edad y el crecimiento radial es casi significativa ($r = -0.23$, $p < 0.06$); y entre el total de los árboles (hasta de 330 años) la correlación es evidentemente significativa ($n = 215$, $r = -0.23$, $p < 0.003$).

La correlación entre la edad y el crecimiento de *P. lumholtzii* es negativa en los cuatro sitios. Sin embargo, solo es estadísticamente significativa ($p < 0.03$) en el sitio del límite inferior de distribución de la especie en el transecto de La Flor (LF B), mientras que en los otros tres sitios la aparente tendencia no es significativa (Cuadro 6.2). Esto podría indicar que la tendencia hacia mayores incrementos en el sitio LF B obedece a factores locales como cambios en densidad.

Sitio	40 años		60 años	
	r	p <	r	p <
LF A	-0.16	0.27	-0.17	0.26
LF B	-0.36	0.03	-0.39	0.02
ME A	-0.07	0.56	-0.09	0.51
ME B	-0.02	0.92	-0.26	0.19

Cuadro 6.2. Coeficientes de correlación (r) entre la edad total de *P. lumholtzii* y su incremento radial a 40 y a 60 años después de su establecimiento.

En las cuatro especies las edades mayores están representadas por una menor cantidad de muestras, las cuales generalmente tienen crecimientos pobres y por lo tanto determinan en gran medida la tendencia de los datos. De lo anterior es posible que: (i) los individuos mas viejos que se muestrearon son árboles que crecieron muy despacio en comparación de los de su generación y por lo tanto no fueron aprovechados forestalmente; (ii) Los individuos que crecen mas despacio en su juventud tienden a ser mas longevos.

6.5 Conclusiones

El análisis del crecimiento radial de *Pinus* spp. revela ligeros aumentos a través del tiempo en las cuatro especies consideradas lo cual coincide con las predicciones sobre el efecto fertilizante del CO₂ en la atmósfera.

Dicho aumento es significativo en tres de las cuatro especies y es mas evidente en el caso de las especies de mayor importancia económica (*P. cooperi* y *P. durangensis*). Esto sugiere que el origen del incremento en las tasas de crecimiento podría estar relacionado con una posible disminución en la densidad de los rodales por el efecto de extracciones selectivas.

Pinus lumholtzii fue muestreado más intensivamente que el resto de las especies, tanto en tiempo (68 árboles de mas de 150 años) como en espacio (cuatro poblaciones). El aumento en las tasas de crecimiento de esta especie, inferido por la correlación edad absoluta – radio parcial, es menor que el de *P. cooperi* y *P. durangensis*. Es significativo para el conjunto total de datos así como para una de las cuatro poblaciones estudiadas. Esto indica posible relación con factores locales.

La tendencia hacia mayor crecimiento que se detectó en *P. lumholtzii* no es significativa si se consideran únicamente los árboles mayores de 150 ó los menores de 120 años. Esto sugiere que el aumento en las tasas de crecimiento no ha sido gradual, sino que ocurrió a finales del siglo XIX, lo que coincide con la época en que empezó a aumentar el CO₂ en la atmósfera.

La correlación entre edad absoluta y el radio a edades determinadas en *P. engelmannii*, al igual que en las otras tres especies es negativa, pero no es significativa. La muestra de esta especie fue más pobre que las muestras de las otras tres especies, tanto en tamaño (31 árboles) como en rango de edad (37-

119 años). Si la hipótesis sugerida en el párrafo anterior es cierta, la ausencia de aumento de crecimiento de *P. engelmannii* podría estar relacionada con la corta edad de los árboles de la muestra.

Para abordar las dos hipótesis planteadas: aumento de crecimiento como respuesta a extracciones forestales, y aumento súbito de crecimiento a mediados del siglo XIX, se requiere analizar una muestra mayor (en cantidad y en rango de edades) de datos sobre crecimiento radial acumulado de las especies de importancia económica (*P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*), estratificados tanto por historial de manejo de los predios como por rango de edades.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN GENERAL

La comunidad científica internacional acepta que durante el último siglo se experimentó un cambio climático mundial (Houghton *et al.* 1992; Walker & Steffen 1999; OECD 1999; Jones *et al.* 2001). Sin embargo no existe consenso respecto de los agentes que lo originan ni de los efectos que este cambio tiene sobre los ecosistemas del planeta. El aumento de CO₂ en la atmósfera a partir de la revolución industrial es uno de los principales factores que se relacionan con el origen del cambio climático (Harrington 1987; Walker & Steffen 1999; OECD 1999). Recientes revisiones indican que el aumento de CO₂ y de otros gases de invernadero así como el cambio climático, ya tienen efectos sobre la biota (Hughes 2000; Walther *et al.* 2002; Vitousek 1994; Parmesan & Yohe 2003; Root *et al.* 2003).

El crecimiento o aumento de biomasa vegetal es uno de los principales bioindicadores para detectar posibles respuestas al cambio climático (Spiecker 1999; Hughes 2000). El proceso de crecimiento se ve afectado por el aumento de CO₂ en la atmósfera de una manera directa por el efecto de fertilización, y de

una manera indirecta por el efecto invernadero (Bazzaz *et al.* 1996, Hughes 2000).

Una gran cantidad de artículos publicados durante las últimas dos décadas reportan aumento en la producción de algunos cultivos y en las tasas de crecimiento de las plantas como respuesta al aumento de la concentración de CO₂, por efecto de fertilización y por aumento de temperatura en latitudes altas (Bazzas *et al.* 1990 y 993; Graybill & Idso 1993; Callaway *et al.* 1994; Campagna *et al.* 1989; Feng *et al.* 1997; Ming & Zhan 1998; Telewski 1998; Curtis 1998).

A pesar de que existe una gran cantidad de reportes científicos internacionales sobre los efectos que el aumento de gases de invernadero y el cambio climático tienen sobre la biota, en México solo existen unos pocos análisis de predicción (Villers & Trejo 1997 y 1998) y estudios sobre captura de carbono (De Jong *et al.* 1995). En latitudes altas son abundantes los estudios sobre la variabilidad climática a través del análisis de los anillos de crecimiento arbóreos. Esta es una de las primeras investigaciones dendroclimáticas en México y es la primera que aborda el tema de tendencias en los índices de crecimiento como posible respuesta al cambio climático.

Se presentan tres nuevas cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de la Sierra Madre Occidental: Las Bayas, Altos del Epazote y Sierra Valparaíso. A diferencia de las cronologías disponibles previamente para la región, El Salto y

Cerro Barajas (Sthale 1999) que abarcan solamente hasta 1993, las tres nuevas cronologías abarcan hasta el año 2001 (Capítulo 3). Esta diferencia es relevante para el estudio del clima regional ya que la década de los 1990's se reconoce como un período de gran variabilidad climática en la que se registran las temperaturas mas altas a nivel mundial durante el último milenio (Mann, *et al.* 1998 y 1999; Jones *et al.* 2001).

En el área de estudio, las condiciones climáticas de invierno y primavera determinan en gran medida la humedad disponible en el suelo durante la siguiente estación de crecimiento. Los inviernos fríos y lluviosos promueven el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii*. Por el contrario, los inviernos con temperaturas máximas altas se relacionan con crecimiento pobre en la siguiente estación (Capítulo 3).

De acuerdo a esto, la tendencia negativa en los índices de crecimiento de las últimas décadas en el sitio Las Bayas (Capítulo 4) indica disminución en la precipitación de invierno y primavera y/o aumento en las temperaturas máximas de invierno. Esto coincide con las tendencias en los registros climáticos de algunas estaciones meteorológicas de la región (Apéndice C).

Se utilizaron tres indicadores para analizar las tendencias en el crecimiento radial de varias especies de Pináceas: i) cronologías de índices de crecimiento (Capítulos 4 y 5); ii) incremento corriente anual a tres edades diferentes

(Capítulo 5); iii) incremento radial acumulado en edades de 15 a 60 años (Capítulo 6). Los tres revelan cambios en las tasas de crecimiento.

Los índices de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Capítulo 4) y de *Pinus lumholtzii* (Capítulo 5) revelan comportamiento inusual del crecimiento de ambas especies durante las últimas décadas del siglo veinte en comparación con los 150 años previos. De las cinco cronologías de *Pseudotsuga menziesii*, dos presentan incrementos en los índices de crecimiento, dos se han mantenido estables y una presenta una clara disminución en el crecimiento. En el caso de *Pinus lumholtzii* se presentan incrementos en los índices de crecimiento de las cuatro cronologías a partir de 1940. Esta tendencia no se sostiene hasta la actualidad en ninguna de las cuatro localidades.

El cambio más evidente en las tasas de crecimiento se observa en la cronología de El Salto a partir de finales del siglo diecinueve. Después de la severa sequía registrada en Durango durante el siglo diecinueve, cuatro de las cinco poblaciones de *Pseudotsuga* estudiadas recuperaron su ritmo de crecimiento mientras que la población de El Salto entró en una fase de evidente decadencia en el crecimiento que termina aproximadamente en 1940. El aumento en el crecimiento detectado en El Salto a partir de dicho año parece estar más relacionado con disturbio que con factores climáticos o atmosféricos. Esto se infiere de las características de dicha cronología: baja relación signo-ruido y baja correlación con el resto de las cronologías estudiadas (Capítulo 3).

Contrario a la hipótesis sobre aumento en las tasas de crecimiento relacionado con fertilización de CO₂ o de otros nutrientes relacionados con cambio global, de las nueve cronologías estudiadas, además de la cronología de El Salto mencionada en el párrafo anterior, solamente la de Cerro Baraja muestra una tendencia positiva de crecimiento en los índices de crecimiento de las últimas décadas.

La disminución en el crecimiento de *Pseudotsuga* durante las últimas décadas en Las Bayas (Capítulo 4) así como las fluctuaciones observadas en el crecimiento de las cuatro cronologías de *Pinus lumholtzii* (Capítulo 5) a partir de 1940 coinciden con las predicciones de los efectos del cambio climático sobre la vegetación de México que indican disminución de la superficie ocupada por bosque templado (Villers & Trejo 1997 y 1998). En todos los casos las disminuciones en el crecimiento durante el siglo veinte se relacionan, en primera instancia, con sequías.

Todas las cronologías estudiadas, tanto de *Pseudotsuga* (Capítulo 4) como de *Pinus* (Capítulo 5) respondieron negativamente a la severa sequía de mediados del siglo diecinueve. Mientras que difieren en su respuesta a las sequías del siglo veinte. Entre las cuatro cronologías de pino triste, las poblaciones del límite inferior han sido afectadas por las tres sequías registradas en el siglo veinte mientras que las dos cronologías del límite superior parecen haber sido mínimamente afectadas por las mismas. Esto coincide con el límite altitudinal de las sequías observado por Navar (com. pers.) en el Noreste de México.

Durante la década de los 1950's se detecta un cambio en los índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* entre altitudes. Hasta entonces las curvas de desviación estándar acumulada de las poblaciones del límite inferior estaban sobre las del límite superior, al ser afectadas las primeras por la sequía, sus curvas de desviación acumulada quedaron por debajo de las de las poblaciones del límite superior. Esto coincide con la hipótesis de este trabajo (aumento en el crecimiento de las poblaciones del límite superior y disminución en las del límite inferior). Así como con las predicciones de cambio climático respecto al posible desplazamiento de las especies en el gradiente elevación (Parmesan & Yohe 2003, Root *et al.* 2003).

Las cinco cronologías de *Pseudotsuga* respondieron a la sequía mas severa de los últimos 200 años a mediados del siglo diecinueve (Stahle *et al.* 1999).

Durante las tres sequías del siglo veinte respondieron de diferente manera. La sequía de los años 1920's afectó muy levemente el crecimiento en Las Bayas y en Sierra Valparaíso; la sequía de los 50's afectó de una manera mas notoria a Sierra Valparaíso y a Cerro Barajas; y la sequía de los 90's afectó el crecimiento en Las Bayas y en Altos del Epazote.

En las cinco cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (capítulo 3) y en las cuatro de *Pinus lumholtzii* (Capítulo 5) existe una mayor variabilidad interanual en los índices de crecimiento de las últimas décadas, lo que coincide con la alta variabilidad climática registrada en la región durante el mismo período

(Apéndice C). La mayor variabilidad interanual durante las últimas décadas en todas las cronologías construidas así como el comportamiento inusual en cada una de ellas con relación a los 150 años previos, coincide con las observaciones de Feng & Epstein (1996) sobre una mayor variación espacial y temporal en el clima mundial del siglo veinte. Esta mayor variabilidad interanual en el crecimiento de las dos especies estudiadas durante las últimas décadas también coincide con la mayor frecuencia de eventos El Niño registrados a partir de 1977 respecto de los últimos 120 años (Walker & Steffen 1999) y con las observaciones sobre la existencia en la actualidad de un período de alta variabilidad climática a nivel mundial (Barnola *et al.* 1999) que se magnifica a nivel regional y local (Návar, com. pers.).

Según los resultados del análisis de tendencias en el incremento corriente anual (capítulo 5) y en el crecimiento radial (capítulo 6), existen evidencias de que las tasas de crecimiento radial de varias especies de *Pinus* de la Sierra Madre Occidental son mayores en el siglo veinte que en el siglo diecinueve.

El incremento corriente anual de *P. lumholtzii* muestra tendencias de aumento en las cuatro poblaciones estudiadas, solamente en una de ellas dicha tendencia es significativa (Capítulo 5).

El incremento radial acumulado a edades de 15 a 60 años de *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. lumholtzii*, inferido de la relación edad absoluta - crecimiento

(Capítulo 6) indica que los árboles establecidos más tarde han crecido más rápido.

El aumento detectado en los índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* a partir de 1940 y sostenido hasta los 1970's en ambas poblaciones del límite superior (Capítulo 5) no parece relacionado con un período particularmente benigno de lluvias. De estar asociado este aumento con el efecto fertilizante del CO₂ coincide con el fenómeno conocido como "down regulation" que consiste en un decremento en las tasas fotosintéticas detectado en varias revisiones amplias sobre el intercambio neto de CO₂ (Mooney *et al.* 1999). Lo cual significa que a mayor tiempo de exposición a niveles altos de CO₂, son menos los efectos positivos en el crecimiento (Körner 1993).

En las tres cronologías de *Pinus lumholtzii* que empiezan antes de 1890, así como en la cronología mas corta de *Pseudotsuga* se observa un incremento en el crecimiento durante la década de los 1880's. Esta tendencia no se observa en las otras cuatro cronologías de *Pseudotsuga*, especie con probada sensibilidad climática en el Norte de México (Díaz 2001 y 2002; Stahle 1993 y 1999). Esta diferencia en respuesta puede indicar: (i) mayor sensibilidad climática de pino triste, lo cual apoyaría las expectativas presentadas aquí con respecto al potencial dendroclimático de la especie (Capítulo 5); ó (ii) que dicho incremento en las tasas de crecimiento obedeciera a un factor de efecto regional diferente de la humedad, probablemente uno que se refleja solamente en las cronologías construidas con árboles relativamente jóvenes.

Las evidencias de fertilización por CO₂ en el crecimiento radial de los árboles de bosque templado en Durango son muy limitadas. Por el contrario, existen razones para suponer que el origen de los cambios detectados es variado y que incluso hay combinación de los mismos: (i) Las tendencias detectadas en el crecimiento no son unidireccionales (en unas poblaciones las tasas de crecimiento de las últimas décadas están aumentando, mientras que en otras están disminuyendo y en otras se mantienen estables; (ii) Los aumentos en las tasas de crecimiento son más evidentes en especies de importancia económica.

Se considera que los cambios en densidad por efecto de extracción selectiva han desencadenado incrementos en las tasas de crecimiento; mientras que las sequías del siglo veinte y las altas temperaturas de invierno han provocado estrés hídrico y posteriores ataques de plagas lo que está ocasionando la decadencia de algunas poblaciones. En tres de las cuatro cronologías de pino y en una de las cinco de *Pseudotsuga* los índices de crecimiento más bajos se presentan durante la última década, particularmente en los años 1998 y 2002. Esta falta de dirección y de constancia en las tendencias observadas en el crecimiento de los árboles en la región refuerzan la idea de una mayor variabilidad espacial y temporal en el clima mundial probablemente magnificado en el clima regional.

En resumen, los resultados de esta investigación indican que:

- 1) El factor más importante que determina las tasas de crecimiento radial en el área de estudio de las dos especies estudiadas es la precipitación pluvial.
- 2) En las últimas décadas del siglo veinte existe una mayor variabilidad temporal y espacial en los ritmos de crecimiento. Esto podría obedecer a una mayor variabilidad en el clima de un año a otro y de un sitio a otro.
- 3) De mediados a finales del siglo diecinueve se presentó un aumento en el crecimiento de *Pinus lumholtzii* y en una población relativamente joven de *Pseudotsuga*. Este aumento no parece relacionarse con un período particularmente benigno en la lluvia por lo que se asume podría relacionarse con algún factor desconocido de efecto regional.
- 4) En dos de las nueve cronologías estudiadas se detecta una tendencia positiva sostenida en los ritmos de crecimiento de los últimos 50 años, periodo en el que se registra un aumento acelerado de CO₂ y de Nitrógeno en la atmósfera.
- 5) Existe una tendencia positiva en el incremento corriente anual de las cuatro poblaciones de *Pinus lumholtzii* estudiadas, ésta es significativa solamente en una de ellas y es más evidente en árboles jóvenes (15-24 años después de su establecimiento).
- 6) Existe una tendencia positiva en el crecimiento radial de las cuatro especies de pino estudiadas. Esta tendencia es significativa en tres de las cuatro especies. Es posible que esté determinada por un incremento

en las tasas de crecimiento a fines del siglo diecinueve y no por un incremento gradual en las mismas. Dicha tendencia es mayor en las especies de importancia económica lo que sugiere relación con disminuciones en la densidad de los bosques por efecto de extracciones forestales.

- 7) La falta de una dirección contundente en las tendencias detectadas en los índices de crecimiento, así como el grado diferencial en las tendencias de aumento en el incremento radial acumulado de las especies con extracción comercial, manifiestan el origen múltiple de los cambios en los patrones de crecimiento aquí reportados.