

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO Y ESTIMACIÓN DEL
CONTENIDO DE CARBONO COMO INDICADORES DE CAMBIO
CLIMÁTICO EN *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, CERRO
EL POTOSÍ, MÉXICO**

**TESIS
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAestrÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

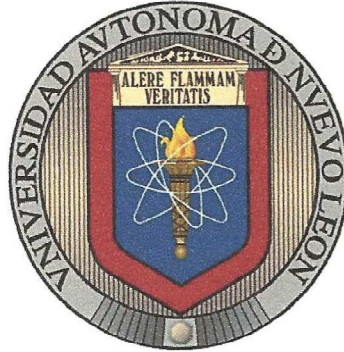
PRESENTA

BIÓL. PAMELA ANABEL CANIZALES VELÁZQUEZ

LINARES, N. L.

DICIEMBRE 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUDIRECCIÓN DE POSGRADO



**ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO Y ESTIMACIÓN DEL
CONTENIDO DE CARBONO COMO INDICADORES DE CAMBIO
CLIMÁTICO EN *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, CERRO
EL POTOSÍ, MÉXICO**

**TESIS
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

PRESENTA

BIÓL. PAMELA ANABEL CANIZALES VELÁZQUEZ

Comité de Tesis:



Dr. Javier Jiménez Pérez
Director



Dr. Oscar A. Aguirre Calderón
Secretario



M.C. Luis G. Cuéllar Rodríguez
Vocal

LINARES, N. L.

DICIEMBRE 2011

*A mi madre Lorena Velázquez López,
mis hermanos Jocelín y Axel y
mis queridas sobrinas Vanessa y Valeria*

AGRADECIMIENTOS

A mi comité de tesis: Dr. Javier Jiménez Pérez, Dr. Oscar A. Aguirre Calderón, M.C. Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez, por su valioso apoyo, recomendaciones y guía durante la realización de la presente investigación.

Al Dr. Javier Jiménez y Dr. Oscar Aguirre, por la confianza depositada en mí para la realización de este trabajo, muchas gracias.

Al personal del Laboratorio Nacional de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA, Dr. José Villanueva Díaz, M.C. Julián Cerano Paredes, Ing. Vicenta Constante García, M.C. Rosalinda Cervantes Martínez, por su gran apoyo durante la preparación de las muestras, análisis de las mismas y apoyo en los análisis estadísticos. Y por recibirme con los brazos abiertos en sus hogares.

Al M.C. Luis Enrique Montes Gonzalez, Lic. Luis Javier Sifuentes Hernández, por su apoyo desinteresado durante el procesamiento de las muestras.

Al Dr. Eduardo Alanís y Lupita Villarreal, por gran amistad, valiosos consejos y por su apoyo académico, laboral y personal en Idiferentes etapas de mi vida.

Al Biól. Hernaldo Padilla Rangel por su valioso apoyo durante las salidas a campo y comentarios a este trabajo.

Al Departamento de Silvicultura y Manejo Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales, al M.C. Israel Yerena, Ing. Claudio Castillo, Ing. Melissa Puga, por su apoyo tanto en el laboratorio, como en salidas a campo y logística de las mismas.

A Juany Castillo y Daisy Villanueva por facilitar material bibliográfico para la realización de este trabajo.

A la M.C. Regina Pérez por su apoyo en la revisión de las secciones en inglés.

A Sandra Cano, Nuria Marroquin, Irene y a todo el personal de la Facultad de Ciencias Forestales por atender siempre amables y atentos y por su apoyo durante la realización de la maestría.

A mis compañeros y amigos Biól. Carla Bustamante, Biól. Indira J. Reta, Biól. Juan Carlos Zurita, . Juany Cervantes, Biól. Jacob H. Vázquez, Biól. Hernaldo Padilla Rangel y Brianda Bernal, por su valiosa amistad.

CONTENIDO

Sección		Página
	LISTA DE FIGURAS	III
	LISTA DE TABLAS	IV
	RESUMEN	V
	SUMMARY	VI
1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	3
	2.1 Cambio climático marco conceptual	3
	2.2 Reacciones del mundo ante el cambio climático	4
	2.3 Emisiones históricas de gases efecto invernadero y sus principales fuentes	5
	2.4 Emisiones de carbono y situación de México	8
	2.5 Efectos del cambio climático	9
	2.6 Captura de carbono	11
	2.4 Efecto de fertilización por CO ₂	12
	2.5 Cambio climático y anillos de crecimiento	13
3	HIPÓTESIS	18
4	OBJETIVOS	18
	4.1 General	18
	4.2 Específicos	18

5	MATERIALES Y MÉTODOS	19
5.1	5.1 Características generales del área de estudio	19
5.2	Descripción del hábitat y situación actual de <i>Pseudotsuga menziesii</i>	21
5.3	Método de muestreo	22
5.4	Determinación del contenido de carbono	23
5.5	Análisis dendrocronológico	24
5.6	Análisis de la información climatológica	25
6	RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
6.1	Obtención dendrocronológica	28
6.2	Correlación crecimiento-precipitación	31
6.3	Correlación crecimiento-temperatura	33
6.4	Calibración y verificación	34
6.5	Reconstrucción y análisis de tendencia de factores climáticos	38
6.6	Análisis de la variabilidad climática	39
6.7	Captura de carbono	42
6.8	Correlación crecimiento-captura de carbono	43
7	CONCLUSIONES	47
8	BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Emisiones históricas de CO ₂ y CH ₄ , expresadas como carbono.	7
2	Área de estudio cerro El Potosí.	20
3	Cronología estándar de ancho total de anillo de <i>Pseudotsuga menziesii</i> para el cerro El Potosí.	30
4	Coeficiente de correlación entre índice de anillo total de <i>Pseudotsuga menziesii</i> y los registros de precipitación para el período 1975-2005 de las estaciones climáticas Dieciocho de Marzo, Galeana y Mimbres.	32
5	Coeficiente de correlación entre índice de anillo total de <i>Pseudotsuga menziesii</i> y los registros de temperatura para el periodo 1975-2005 de las estaciones climáticas Dieciocho de Marzo, Galeana y Mimbres.	34
6	Verificación y calibración del modelo utilizado para la reconstrucción que incluyó el periodo total de datos (1975-2005).	36
7	Gráfico de dispersión del modelo regresión lineal que muestra la variabilidad de la cronología de anillo total con la precipitación total de enero-julio, período 1975-2005.	38
8	Asociación entre el índice de anillo total y precipitación estacional observada para el período enero-julio, período 1975-2005.	39
9	Precipitación observada (línea sólida) y reconstruida (línea punteada) para el período estacional enero-julio, período 1975-2005.	40
10	Reconstrucción regional de precipitación estacional (enero-julio) para el cerro El Potosí.	41
11	Relación entre el porcentaje de carbono capturado a través del tiempo y ancho de anillo total.	46

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Resumen de resultados de COFECHA para ancho total de anillo de la serie de crecimiento de El Potosí.	29
2	Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno-primavera.	37
3	Análisis de varianza del modelo de regresión.	37
4	Porcentaje de carbono capturado por década.	43

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en el Área Natural Protegida cerro El Potosí en Galeana, Nuevo León. Con el objetivo de determinar a través de análisis dendroclimáticos y la determinación de contenido de carbono, si existen cambios en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* como respuesta al cambio climático. Para lo cual se desarrolló una serie dendrocronológica de anillo total con una longitud de 143 años (1868-2010). Y fue posible reconstruir sequías severas para los periodos 1870-1878, 1887-1900, 1908-1919, 1943-1962, 1974-1981 y 1994-2002. Observándose que existe un aumento en la variabilidad climática en los últimos años en la región, así como una modificación en el intervalo de tiempo entre los eventos secos y húmedos. En relación al análisis de contenido de carbono en los anillos de crecimiento, no hubo evidencias de un incremento en el contenido de carbono en los últimos 90 años, que pueda atribuirse al aumento del CO₂ atmosférico, es posible que en caso de presentarse tal efecto, la complejidad del sistema natural lo atenúa o bien los anillos de crecimiento de la especie estudiada no respondan al mismo. Por lo tanto se puede concluir que el efecto de la variabilidad climática es realmente el que da lugar a los cambios en los anillos de crecimiento a través del tiempo. La tendencia actual de cambio climático pudiera favorecer eventos climáticos extremos y de mayor frecuencia.

SUMMARY

This study was carried out in the Protected Natural Area (ANP) cerro El Potosi in Galeana, Nuevo Leon. With the objective to determine through dendroclimatics analyzes and the determination of carbon content, if changes in the tree rings of *Pseudotsuga menziesii* in response to climate change. The tree-rings series extended for the period 1868-2010 (143 years). Severe droughts were reconstructed for the periods 1870-1878, 1887-1900, 1908-1919, 1943-1962, 1974-1981 y 1994-2002. Was observed that there is an increase in climate variability in recent years in the region, as well as a modification in the time interval between dry and wet events. In relation to the analysis of carbon content in the tree rings, there was no evidence of an increase in carbon content in the last 90 years, that could be attributed to increase atmospheric CO₂, is possible that if present the effect is attenuated by the complexity of the natural system or tree rings of the specie do not respond to it. We can therefore conclude that the effect of climate variability is actually produced changes in the tree rings over time. The current trend of climate change could favor extreme weather events and more frequent.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es considerado como una de las principales alteraciones al funcionamiento de los ecosistemas en los últimos tiempos. El incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera en las últimas décadas hace suponer efectos en la vegetación, debido al efecto de fertilización por CO₂, el cual tiene repercusiones directas sobre el crecimiento y fisiología de algunas plantas, lo que puede causar alteraciones estructurales y de funcionamiento en las comunidades vegetales y en los ecosistemas en general. Asociado a esto, se encuentra la alteración del clima de la Tierra, que ha producido cambios en los patrones de precipitación asociados al calentamiento global, alterando el comportamiento natural del ciclo hidrológico.

Los bosques cubren un 27% de la superficie terrestre, se estima que el 80% del carbono que la vegetación y los suelos intercambian con la atmósfera corresponde a los bosques. Los ecosistemas forestales destacan por albergar gran parte de la biodiversidad terrestre, y su correcto funcionamiento es esencial para el mantenimiento de dicha diversidad. El potencial de secuestro de carbono de éstos depende del contenido inicial en carbono orgánico, de las tasas de crecimiento, edad del rodal, así como de la capacidad biológica inherente del ecosistema. Sin embargo, los bosques, específicamente los de tipo templado, estarán mayormente afectados por el calentamiento global a latitudes altas, con incrementos en la temperatura y por las precipitaciones en las latitudes más bajas, causando una mortandad significativa, ya que se producirían desplazamientos hacia el norte, causando pérdidas locales importantes. En esta situación se encuentra la vegetación del cerro El Potosí, pues cumple con los rangos altitudinales idóneos para albergar comunidades vegetales frágiles.

En el presente estudio se analiza la existencia de un incremento en la captura de carbono, mediante el análisis de los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco como respuesta al cambio climático.

2. ANTECEDENTES

2.1 Cambio climático -marco conceptual-

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja, hoy en día se define como un estado cambiante de la atmósfera, con interacciones entre el mar y el continente, a diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano, o por forzamientos externos, como algún cambio en la intensidad de la radiación solar o incluso cambios en las características del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo, etc.) resultado de la actividad humana (Magaña, 2004).

Las formas de variabilidad del clima son extensas y, por lo tanto, pronosticarlo a largo plazo resulta complicado. Y aunque bien se entienden las causas astronómicas de estas variaciones, existen fluctuaciones en escalas de días a siglos, de gran interés para la sociedad, que están lejos de ser explicadas. En este sentido se conoce que ciertos factores pueden producir cambios en el clima, aunque no de manera precisa. Tal es el caso del cambio climático del último siglo (Magaña, 2004). Término que se utiliza para referirse al cambio significativo que se presenta en la actualidad y que no se relaciona con las variaciones cíclicas. El cual 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, y que incide sobre los patrones de temperatura y precipitación del planeta, así como en la frecuencia y severidad de eventos extremos como huracanes y sequías (González *et al.*, 2003).

El ambiente a nivel mundial se ha visto impactado por las actividades humanas en los últimos cinco siglos; particularmente desde el siglo XIX a la actualidad, actividades tales como la industrialización, urbanización, agricultura y deforestación, han contribuido a incrementar la concentración de manera antropogénica de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (Goldsmith, 2006). Entendiéndose por gases de efecto invernadero (GEI), a cualquier gas en la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y reemite radiaciones infrarrojas a la Tierra. Los GEI cubren una amplia gama de gases, tales como: vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), fluorocarbonos halogenados (HFCs), ozono (O₃), hidrofluorocarbonos (HFCs), entre otros (González *et al.*, 2003; Cuatecontzi y Gasca, 2004).

2.2 Reacciones del mundo ante el cambio climático

Fue a principios de los años setenta, que el tema del cambio climático cobró importancia, al hacerse evidente que las concentraciones de CO₂ estaban aumentando a pasos constantes y que la temperatura de la baja atmósfera también. Como consecuencia se llevó a cabo la primera Conferencia del Clima Mundial, con el objetivo de revisar los conocimientos existentes sobre el cambio y la variabilidad climática debido a las causas naturales y antropogénicas, y para evaluar las posibles modificaciones futuras y sus implicaciones en las actividades humanas (Ávalos, 2004).

De esta manera en la década de los 80 se estableció el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), cuya función es evaluar la información científica disponible, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático, y formular estrategias de respuesta (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Asimismo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se planteó por objetivo lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera en un nivel tal, que no se generen interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Por lo que se acordó que se controlarían las emisiones de seis GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PECs) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Por su parte el Protocolo de Kyoto adoptado en 1997, estableció la obligación legal de los países desarrollados y países con economías en transición a economías de mercado para reducir en un 5.2% las emisiones de los GEI comparado con los niveles de 1990 (Aquiles *et al.*, 2004). Mediante este compromiso surge el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), instrumento por el cual los países desarrollados patrocinan proyectos cuyo objetivo sea disminuir las emisiones de GEI en los países en desarrollo que firmaron el Protocolo y así obtener Certificados de Reducción de Emisiones (CRE), los cuales son aplicables para cumplir con sus propias metas de disminución o colocarlos en el mercado internacional del carbono (Carrillo *et al.*, 2008).

2.3 Emisiones históricas de gases efecto invernadero y sus principales fuentes

Desde los tiempos preindustriales, las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero han aumentado debido a actividades humanas, alcanzando en la década de los 90 los niveles más altos registrados, y la mayoría de estas concentraciones se han incrementado (IPCC, 2002).

De acuerdo al IPCC (2007) las emisiones de los GEI abordadas en el Protocolo de Kyoto aumentaron aproximadamente un 70% (de 28,7 a 49,0 GtCO₂-eq) desde 1970 a 2004 (en un 24% desde 1990 a 2004). El metano (CH₄) aumentó un 40% desde 1970, debido al incremento de un 85% de la combustión y uso de combustibles fósiles; sin embargo, la agricultura es la mayor fuente, por su parte el óxido nitroso (N₂O) aumentó en un 50%, principalmente al uso de fertilizantes y al crecimiento agrícola. Mientras que el dióxido de carbono (CO₂) aproximadamente aumentó un 80%, siendo la fuente con mayor crecimiento. La concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm en 1750 a 384 ppm en 2004, y continúa con una tasa de 1.8 ppm por año. Se estima que alcanzará entre 550 y 700 ppm para el año 2050, convirtiéndolo en el GEI más importante (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Este incremento se explica por el crecimiento de dos fuentes antropogénicas de emisión de carbono: el consumo de energías fósiles (petróleo, gas, carbón) y los cambios en la utilización de las tierras o las transformaciones de los ecosistemas (en particular la deforestación) (Locatelli, 2001; Cuatecontzi y Gasca, 2004). De manera desglosada se tiene que en el año 2004, el suministro energético representó aproximadamente el 26% de las emisiones de GEI, la industria el 19%, los gases emitidos por el cambio en los usos del territorio y la silvicultura el 17%, la agricultura el 14%, el transporte el 13%, los sectores residencial, comercial y de servicios el 8% y los residuos el 3% (IPCC, 2007).

Las cifras históricas reportan que durante los años 80, el consumo de energías fósiles representaba aproximadamente 5.6 ± 0.5 GtC/año y la deforestación 1.6 GtC/año (Dixon *et al.*, 1994; Locatelli, 2001). Posteriormente en la década de los 90 el carbono atmosférico proveniente de la deforestación en los trópicos se cifraba entre 1.1 ± 0.3 GtC año⁻¹ y 1.6 ± 0.4 GtC año⁻¹ (Achard *et al.*, 2004; Houghton, 2005); cifras que han aumentado dado el decremento en la tasa de

uso agrario-forestal y agrícola entre 1900 y 2000 (Fig. 1), estimada en 6,90 Mha año⁻¹ (FAO, 2001). Su importancia es notoria en comparación con las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles e industria del cemento, estimadas en $6.3 \pm 0.4 \text{ GtC año}^{-1}$, referidas a la década 1990-1999 (Prentice *et al.*, 2001).

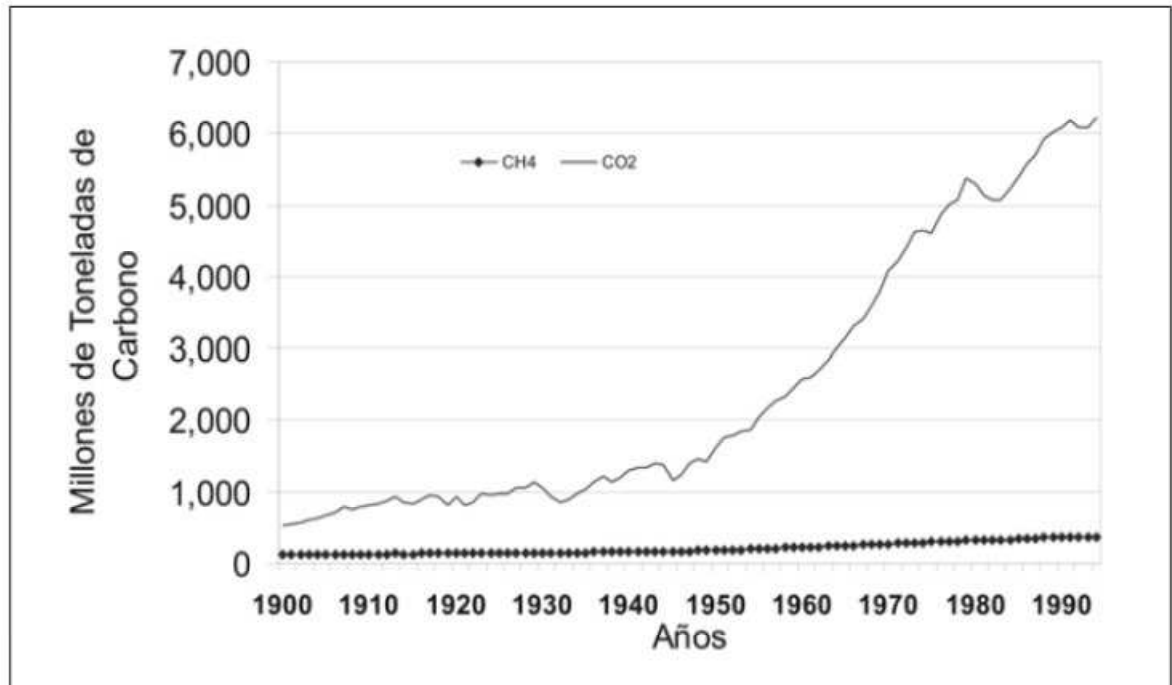


Figura 1. Emisiones históricas de CO₂ y CH₄, expresadas como carbono^A

^A toneladas de CO₂= toneladas de carbono *(44/12), toneladas de CH₄= toneladas de carbono *(16/12). Fuente: Marlan *et al.*, 2003.

La FAO estima que 13.7 millones de hectáreas se deforestaron entre 1990 y 1995 en países en vías de desarrollo. Países como Brasil, Indonesia, República del Congo, Bolivia, México, Venezuela, Malasia, Myanmar, Sudán y Tailandia fueron los responsables de la pérdida de 7.4 millones de hectáreas de bosques, es decir el 50% de toda la deforestación anual de ese año (Roper y Roberts, 1999).

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) afirma que si no se detiene la destrucción de bosques es poco probable lograr la estabilización atmosférica de GEI a un nivel tal que se eviten los peores efectos del cambio climático (Pardos, 2010).

2.4 Emisiones de carbono y situación de México

A lo largo del siglo XIX y durante la mayor parte del XX, la biósfera terrestre fue una fuente neta de CO₂ atmosférico, pero antes del fin del siglo XX se convirtió en un sumidero neto debido a una serie de factores, como los cambios en el uso de los suelos. Las prácticas en el manejo de dichas tierras dieron lugar a un aumento de la deposición antropogénica de nitrógeno, a crecientes concentraciones atmosféricas de CO₂ y posiblemente, al calentamiento climático (IPCC, 2002).

En el año 2002 los principales emisores de GEI, en términos de CO₂ equivalente fueron: el sector energético con 389,497 Gg², que representa 61% de las emisiones; le siguen los correspondientes al uso del suelo, cambio en el uso del suelo y deforestación (USCUSD) con 14% (89.854 Gg); desechos con 10% (65.584 Gg); procesos industriales con 8% (52.102 Gg) y la agricultura con 7% (46.146 Gg) (INE, 2006).

En relación a las emisiones de carbono, México emitió 2,627 millones de toneladas de carbono que correspondieron al 1% de las emisiones totales durante el periodo considerado (1900-2000), ubicándose en la posición número 15, junto con la República Checa y Bélgica cuyas emisiones fueron similares (Arvizu, 2004).

En el año 2000, se estimó la contribución de los países a las emisiones, realizando una clasificación de los países en nueve regiones, las cuales en su conjunto emitieron 6,388 millones de toneladas de carbono. Las regiones con

mayor contribución fueron Norteamérica (28%), Europa Occidental (16%), Asia y Europa del Este (13%). En estas regiones existen países con mayor contribución; tal es el caso de Estados Unidos de América, que aporta 92.6% de la región de Norteamérica. En Asia, China aporta 92.6% de las emisiones de esta región y es el principal productor de carbón y cemento del mundo. Mientras que en Europa Occidental dominan Alemania, Reino Unido, Italia, Francia y España, los cuales contribuyen con 74% de las emisiones de la región, y finalmente en Europa del Este influyen Rusia y Ucrania (Arvizu, 2004).

En lo que respecta a México, éste contribuye junto con Brasil con el 51.6% de las emisiones en la región de Centro y Sudamérica; México contribuye con 98 de los 359 millones de toneladas de carbono, colocándose en la posición 12 de los 15 países que más contribuyen a las emisiones mundiales de CO₂ por quema de combustibles fósiles y se ubica en el 93° lugar por emisiones per cápita (3.7 t CO₂ equivalentes). Al considerarlo en el contexto de América Latina y El Caribe, México contribuye con 27.3% de las emisiones, con un índice de 1.1 toneladas de carbono por habitante por año. En general se ha observado una tendencia en las regiones y países industrializados, a excepción de Estados Unidos de América, de reducir las emisiones en la última década, ubicándolo históricamente como el principal país emisor de CO₂, al contribuir con 30.3% de las emisiones históricas y con 24.19% de las emisiones en el año 2000 (Arvizu, 2004).

2.5 Efectos del cambio climático

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta, es uno de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo (Ordóñez y Masera, 2001). Escenarios futuros proyectan que para las próximas dos décadas el calentamiento puede ser de aproximadamente 0.2°C por década, para un rango de escenarios de emisiones

(Special Report on Emissions Scenarios-SRES'), y que para el año 2100 la temperatura puede incrementarse entre 1.8 a 4.0°C por encima del promedio de 1980-1999 (Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla, 2007).

Asociado al cambio de temperatura se encuentran las tasas de cambio, aumentando de forma rápida: 1) el cambio climático (calentamiento global, aumento de la variabilidad climática interanual e interdecadal, etc.), 2) cambios en los ciclos biogeoquímicos (aumento de la emisión de carbono hacia la atmósfera, aumento de la deposición de nitrógeno y azufre, cambios en la concentración de ozono), y 3) cambios en la gestión y uso del suelo (deforestación y roturación de bosques, fragmentación, abandono de tierras agrícolas, cambios en el régimen de talas, gestión de incendios, etc.)(Valladares, 2004).

Otros efectos registrados han sido sobre los seres vivos, según Hughes (2000), se pueden clasificar en diferentes categorías: 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 foto-periodo, horas/frío, etc.); y 4) adaptación (cambio micro-evolutivos *in situ*).

Otros cambios que distintos autores han señalado es la reducción de áreas boscosas en el planeta (González *et al.*, 2003). Así como efectos en las estaciones de reproducción de animales y plantas, y la frecuencia de plagas y brotes de enfermedades. Algunos ecosistemas costeros o aquellos en altitud y latitud altas también se han visto afectados por los cambios en el clima regional. Se estima que el impacto de la elevación del mar sobre los ecosistemas costeros variará en diferentes regiones según la erosión causada por los mares, como por ejemplo los manglares, humedales costeros y pastos marinos. Así también las especies con rangos climáticos limitados y/o pequeñas poblaciones son normalmente las más vulnerables a la extinción. Figurando especies

montañosas endémicas y biota restringida insular, peninsular o costera (IPCC, 2002).

Entre los impactos estimados por el cambio climático en América Latina se encuentran: aumento en la velocidad en la que se pierde la biodiversidad; impactos adversos en bosques nublados y tropicales; inundaciones y sequías más frecuentes, con inundaciones que aumentan la descarga de sedimentos, causando degradación de la calidad del agua; los ecosistemas de manglares se degradarán o perderán, debido a la elevación del mar, lo que reducirá las poblaciones de algunos tipos de peces (IPCC, 2002).

2.6 Captura de carbono

Una de las alternativas para reducir la cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera es implementar el uso de biocombustibles, lo que posibilita la disminución en el uso de los combustibles fósiles. Otra opción es la captura de carbono. Todos los vegetales utilizan el CO₂ atmosférico en la fotosíntesis, por lo tanto las áreas con cubierta vegetal son reservorios potenciales de carbono, que si son bien manejados, pueden mantener el carbono secuestrado por varios años, incluso es factible que su concentración crezca de manera continua (Carrillo *et al.*, 2008).

Los bosques cubren una superficie de $41,70 \times 10^6$ km² (27% de la superficie terrestre) con proporciones de 25%, 33% y 42% respectivamente para los bosques templados, boreales y tropicales y contienen el 77% de la biomasa viva. Se estima que el 80% del carbono que la vegetación y suelos intercambian con la atmósfera corresponde a los bosques. Éstos, al incorporarse el carbono en el crecimiento de los árboles, actúan como sumideros (2,30 GtC año⁻¹ en términos muy amplios) y juegan un papel importante en el balance de carbono contribuyendo a reducir el contenido en la atmósfera del CO₂ procedente de las emisiones antropogénicas (Pardos, 2010).

México presenta condiciones muy propicias para las acciones de mitigación en el área de recursos naturales. En 1990, aproximadamente 25% de la superficie del país (50 millones de hectáreas) estaba cubierta por bosques y selvas. De este total, un poco más de la mitad eran bosques (25.5 millones ha) y ligeramente menos correspondían a la vegetación tropical (24.1 millones ha). Adicionalmente existían alrededor de 62 millones de hectáreas forestales con vegetación semiárida, como matorrales entre otros tipos (Jong *et al.*, 2004).

Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Ordóñez y Maser, 2001).

Los bosques pueden ser muy vulnerables al cambio climático y representan un almacén de carbono aproximado de 8'000,000 Gg, valor equivalente a las emisiones mundiales de CO₂. Su capacidad de almacenamiento de carbono se pierde rápidamente por la deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (Cruz, 2007).

La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono se considera una de las opciones para reducir las emisiones atmosféricas de CO₂ generadas por las actividades humanas (IPCC, 2005).

2.7 Efecto de fertilización por CO₂

Los ecosistemas terrestres poseen la capacidad de funcionar como sumideros de carbono, pero esto depende del “efecto de fertilización” debido al aumento en la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera y a la deposición del nitrógeno atmosférico, que se ha emitido en exceso por las diversas actividades humanas. Este efecto de fertilización por CO₂ es posible ya que su concentración atmosférica actual limita la capacidad productiva de las plantas (Jaramillo, 2004).

Sin embargo, existen serias dudas acerca de que el continuo incremento de CO₂ pueda estimular la producción y el crecimiento (Bazzaz, 1990) o con respecto a si los bosques podrían funcionar como sumideros de carbono (Norby *et al.*, 1992). La falta de correlación entre los valores de producción y los de fotosíntesis muestran que la mayor disponibilidad de CO₂ no es un buen predictor de las respuestas de crecimiento (Tognetti *et al.*, 2000).

Varios investigadores han planteado posibles mecanismos a través de los cuales esa mayor producción de fotosintatos se introduciría en canales metabólicos diferentes de la síntesis de nueva biomasa estructural, por ejemplo mediante un aumento del gasto respiratorio (Körner, 2003; Stan *et al.*, 1994).

Estudios mencionan que más CO₂ en la atmósfera puede beneficiar a las plantas de dos maneras: 1) se puede decir que conseguirán mayor crecimiento, debido que pueden realizar más fotosíntesis; y también 2) se puede decir que son menos susceptibles a la sequía. No obstante un incremento de CO₂ a niveles estimados para el próximo siglo podría afectar a las plantas en todo el mundo, alterando su ritmo de crecimiento y su equilibrio hídrico (Adams, 2007).

Específicamente para México, este fenómeno es de singular importancia pues, por un lado, se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de estos gases y por el otro, se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones bioclimáticas y socioeconómicas (Gay, 2000; Ordóñez y Masera, 2001).

2.8 Cambio climático y anillos de crecimiento

La dendrocronología (estudio de los anillos de crecimiento en árboles y plantas leñosas) ha sido ampliamente utilizada para investigar el efecto del estrés climático sobre el crecimiento de los árboles (Jacoby y D'Arrigo, 1997). La medida de los anillos de crecimiento proporciona información referente a la solvencia del crecimiento de los individuos. Puesto que la distribución de

carbono a la madera del tronco tiene baja prioridad dentro de la jerarquía general del árbol (por detrás de la formación de brotes y biomasa fotosintética, producción de raíces y acumulación de sustancias de reserva), su cuantía puede dar una idea de la cantidad de carbono que la planta puede acumular una vez satisfechos los sumideros más prioritarios (Linares y Camarero, 2010).

Los anillos de crecimiento, como archivos naturales, proporcionan datos indirectos importantes (Carrer y Urbinati, 2004), para el desarrollo de estudios paleo-ambientales y reconstrucciones climáticas de alta resolución del milenio pasado (Díaz, 2002; Díaz *et al.*, 2002; Biondi *et al.*, 2005; Brienen y Zuidema, 2005; Villanueva *et al.*, 2007; D'Arrigo *et al.*, 2008).

Las principales fortalezas de los anillos de crecimiento como indicadores de cambio climático son: 1) la capacidad de realizar aproximaciones de resolución anual, 2) la existencia de una gran escala de patrones geográficos de variabilidad sincrónica interanual, 3) la creciente disponibilidad de una amplia red de cronologías de anillos de árboles que cubren gran parte de las regiones terrestres del mundo, y 4) la posibilidad de emplear modelos lineales simples de las relaciones clima-crecimiento que puede ser fácilmente verificadas y calibradas (Hughes, 2002).

Las mediciones de los anillos de crecimiento pueden ayudar a evaluar los efectos de cambios climáticos y ambientales recientes sobre el crecimiento de los árboles (Jacoby *et al.*, 1997), así como a distinguir los cambios ambientales ya sean de causa natural o antropogénica; estos datos pueden utilizarse para determinar si los cambios climáticos actuales son inusuales y si son debidos a las actividades antropogénicas (específicamente el aumento de CO₂ y otros gases) o se encuentran dentro de los rangos de variabilidad natural del clima (Jacoby y D'Arrigo, 1997; D'Arrigo *et al.*, 2007).

Actualmente el uso de series de anillos de árboles se ha extendido a la validación de modelos climáticos en el contexto de evaluación de calentamiento global (Carrer y Urbinati, 2004), así como la evaluación de los efectos del reciente cambio climático y ambiental en el crecimiento de los árboles (Jacoby y D'Arrigo, 1997). Asimismo, los anillos de crecimiento son utilizados para evaluar si la fertilización directa de CO₂ debido al aumento de CO₂ atmosférico (normalmente limitando en crecimiento de las plantas) es actualmente un potenciador del crecimiento en la vegetación natural (Jacoby y D'Arrigo, 1997). La respuesta del crecimiento de las plantas como efecto de la fertilización directa con CO₂ ha sido demostrada en numerosos experimentos de laboratorio, generalmente empleando plántulas (Allen y Amthor, 1995). Los modelos sugieren que este crecimiento potenciado puede ser resultado de un mayor secuestro de carbono en los ecosistemas terrestres, siempre y cuando el crecimiento sea suficientemente grande (Reynolds *et al.*, 1992; Wullschleger *et al.*, 1995).

Sin embargo, no se ha demostrado si este efecto se está produciendo a gran escala en la vegetación natural, donde las condiciones ambientales son extremadamente complejas. Sin embargo, existen diversos estudios en los cuales se evalúan los posibles efectos de la fertilización directa de CO₂ en el crecimiento radial de los árboles que crecen en condiciones ambientales naturales (Jacoby y D'Arrigo, 1997). Por lo tanto, el impacto de este efecto en el almacenamiento de carbono de la biosfera es de suma importancia debido a la posible retroalimentación negativa en el clima global (Bugmann y Bigler, 2011).

Un estudio realizado en el suroeste de Estados Unidos determinó que los anillos de crecimiento de *Pinus flexilis* presentaban un crecimiento inusual durante el siglo pasado, a lo cual concluyeron que dicho crecimiento se debía al aumento de fertilización con CO₂ (LeMarche *et al.*, 1984).

No obstante, Graumlich (1991) en su estudio realizado en la Sierra Nevada no encontró evidencia en *Pinus balfourniana* para determinar una fertilización con CO₂, a lo cual concluyó que las tendencias no fueron inusuales en relación al periodo pre-antropogénico y las variaciones en el crecimiento fueron en gran medida explicadas por las relaciones climáticas con el crecimiento. Otros estudios como el del Kienast y Luxmoore (1988), tampoco encontraron resultados positivos para el efecto de fertilización en árboles de las Montañas Rocallosas en Colorado.

Resultados contrastantes fueron los que encontraron Graybill e Idso (1993), quienes reportan que la fertilización con CO₂ es detectable en ciertas especies de pinos que crecen en altas elevaciones del suroeste de Estados Unidos de América.

En general, los efectos de niveles elevados CO₂ en la mayoría de las plantas son un mayor crecimiento mediante el aumento de las tasas fotosintéticas, el área foliar individual, duración del área foliar y el uso eficiente del agua (Isebrands *et al.*, 2001).

También se ha mencionado que posiblemente existe una relación directa entre el incremento de CO₂ con las tasas de crecimiento y la longevidad de las plantas; sin embargo, se sabe por estudios agrícolas de fertilización de CO₂ que la longevidad de las plantas tiende a disminuir bajo condiciones de alto CO₂, es decir, la maduración de los cultivos se realiza antes, de tal manera que las plantas envejecen y mueren de forma prematura en comparación con las plantas de condiciones controladas (Kimball *et al.*, 1995).

Aunque estudios mencionan que este efecto puede durar por un tiempo prolongado (Norby *et al.*, 2005; Moore *et al.*, 2006), cada vez hay más acuerdo en que los efectos del CO₂ son menores en las etapas posteriores del

desarrollo, es decir, cuando el tamaño de copa y el índice de área foliar han llegado a valores estables (Bugmann y Bigler, 2011).

3. HIPÓTESIS

Existen cambios en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* coincidentes con los cambios en los patrones climáticos del último siglo; asimismo es posible detectar un aumento en el contenido de carbono en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* debido a un incremento de CO₂ atmosférico.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Determinar a través de análisis dendroclimáticos y la estimación del contenido de carbono, si existen cambios en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* como respuesta al cambio climático.

4.2 Específicos

- Desarrollar una cronología con base en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en el cerro El Potosí.
- Estimar las correlaciones crecimiento-precipitación de *Pseudotsuga menziesii*.
- Estimar las correlaciones de crecimiento-temperatura de *Pseudotsuga menziesii*.
- Reconstruir la precipitación de la región para el periodo 1868-2010.
- Estimar la correlación de crecimiento-captura de carbono por decenio en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Características generales del área de estudio

El cerro El Potosí forma parte de la Sierra Madre Oriental al sur del estado de Nuevo León. Alcanza una altitud de 3670 m.s.n.m. se localiza a 15 km al oeste de Galeana, Nuevo León, entre los 24° 50'60" y 24 53'16" de latitud norte y los 100° 16'9" y los 100° 15'12" de longitud oeste (Fig. 2). El Potosí se ubica en el flanco occidental de la Sierra Madre y colinda hacia el suroeste con la Altiplanicie Mexicana. Su topografía es de lomeríos bajos, haciéndose escarpadas las pendientes en el extremo noreste y el flanco oriental. El sustrato está constituido principalmente por roca caliza, los suelos son delgados, con alta proporción de materia orgánica y están clasificados como una combinación de Litosol y Rendzina de textura fina (García y González, 1991).

La vegetación por debajo de los 3500 m.s.n.m. se encuentra en grave estado de deterioro debido a incendios y la tala desmesurada, excepto en cañadas y sitios escarpados. A menos de 1700 m.s.n.m., en los alrededores del cerro, se presentan matorrales xerófilos y bosque abierto de *Pinus arizonica* y/o *P. cembroides*. En términos generales se presentan comunidades más altas y densas en el flanco oriental y norte del cerro, debido a la influencia de los vientos alisios. Las principales comunidades vegetales del declive oriental son: matorral de *Berberis trifoliata*, *Juniperus erythrocarpa*, *Condalia* sp. y *Rhus trilobata* entre los 2000 y 2070 m de altitud. De los 2070 a los 2180 m.s.n.m. predomina un bosque abierto de *Pinus arizonica* y *P. cembroides*, que es substituido por bosques de *Quercus* hasta los 2300 m.s.n.m.; de los 2300 a los 2600 m.s.n.m. prevalecen matorrales secundarios de *Quercus-Cercocarpus* con individuos aislados de *Pseudotsuga*. Un bosque muy perturbado de *Pinus pseudostrabus* con matorral de *Quercus* sp. y *Ceanothus* sp. se presenta en áreas entre los 2560 y 2650 m.s.n.m. en exposiciones al norte y oriente entre

los 2670 y 2700 destaca *Pinus* y *Pseudotsuga*. *Pinus hartwegii* predomina entre los 2850 y 2930 m.s.n.m., asociándose con *P. ayacahuite*. De los 2930 a los 3000 m ocurre un matorral denso de *Quercus greggii* con individuos de *P. hartwegii* y *Pseudotsuga menziesii*. Más arriba predomina *P. hartwegii*, que es substituido en cañadas y exposiciones al norte por *P. ayacahuite* y *Abies vejari* hasta los 3470 m.s.n.m.; el bosque de *P. hartwegii* alcanza la cima del cerro por el lado norte, pero en el declive oriental es substituido a partir de los 3450 m.s.n.m. por matorral de *Pinus culminicola* (García y González, 1991).

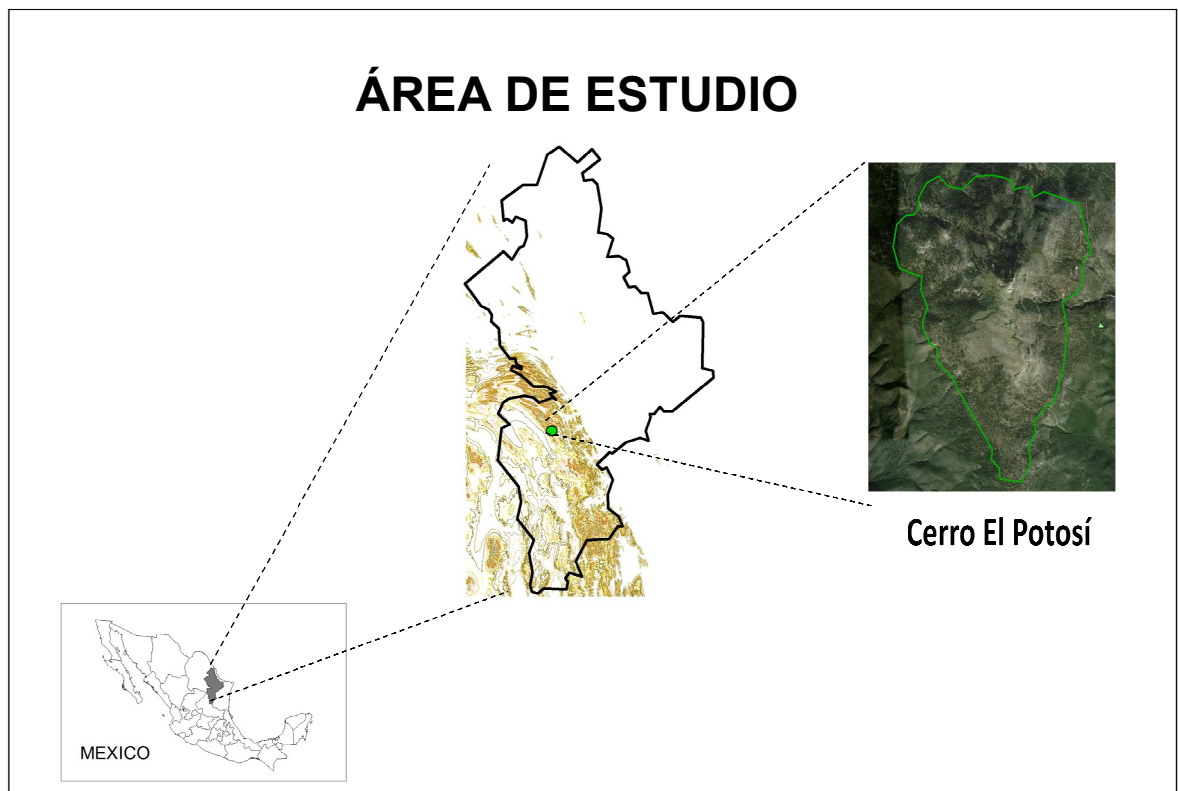


Figura 2. Área de estudio cerro El Potosí

5.2 Descripción del hábitat y situación actual de *Pseudotsuga menziesii*

La especie seleccionada para el presente trabajo fue *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco también conocida como ayarín, cahuite, pinabete, pino de Oregon o Douglas-fir. Es una especie característica de bosques templados, se encuentra presente en elevaciones superiores a 2,300 m.s.n.m. aunque es más común entre los 2,600 y 3,100 m.s.n.m. de elevación en sitios de las Sierras Madre Occidental, Oriental, Eje Neovolcánico y Sierra de Oaxaca. Es una especie altamente sensible a los cambios climáticos (Herman y Lavander, 1990), como la variabilidad climática (Villanueva *et al.*, 2008); esta especie fue seleccionada por ser una de las especies predominantes en el cerro El Potosí. Asimismo, *Pseudotsuga menziesii* posee gran potencial dendrocronológico (Cerano *et al.*, 2009), por ello es de amplio uso dendrocronológico en México y otras partes del mundo especie (Stahle *et al.*, 2000; Cleaveland *et al.*, 2003), por lo que es considerada como unas de las especies más importantes a nivel mundial, debido a que sus capas de crecimiento anual bien diferenciadas almacenan en sus estructuras celulares información climática tanto de la época fría como cálida del año.

En nuestro país, por constituir el límite latitudinal de distribución de la especie, sólo se observan rodales aislados y dispersos en superficies pequeñas y asociadas con otras coníferas y latifoliadas, lo cual les hace de alta biodiversidad. Estos rodales se ubican en cañadas y sitios sombreados con exposición norte y mayor disponibilidad de humedad, aunque en suelos de baja fertilidad y generalmente en sitios de pobre calidad que limitan su crecimiento (Villanueva *et al.*, 2008). Suele prosperar en suelos someros, pedregosos, poco desarrollados, de pH ácido o alcalino, textura media con un contenido de materia orgánica de pobre a rico (Domínguez, 1994).

Los tipos climáticos donde se ha detectado varían de Cw_{bm} (frío subhúmedo), Cw_b (subhúmedo), C(w)₂ templado subhúmedo en los estados de Sonora, Durango y Chihuahua a Bw y C(w)₁ con clima seco y mésico en los estados de Coahuila y Nuevo León (Villanueva y McPherson, 2002).

Lo limitado de la especie en términos de superficie ocupada y número de poblaciones existentes en México ha obligado a que haya sido incluido en la NOM-059-ECOL-2001 como especie «en riesgo»; situación que, en teoría, la excluye de cualquier aprovechamiento forestal. No obstante lo anterior, el cambio de uso de suelo asociado a presiones sociales para expandir la frontera agrícola, tala ilegal, incendios de origen antropogénico, sobrepastoreo y problemas de plagas y enfermedades han hecho que muchas de las poblaciones de esta especie hayan desaparecido, estén en proceso de desaparecer o se encuentren en condiciones muy degradadas (Villanueva *et al.*, 2008).

El abeto Douglas es de las coníferas más longevas en México, puede llegar a vivir más de 550 años, lapso en el cual desarrolla relaciones ecológicas muy estrechas con otros organismos, de tal manera que al romper esta relación puede dar lugar a la desaparición de las especies asociadas tanto animales como vegetales.

5.3 Método de muestreo

Se establecieron doce sitios de muestreo ubicados entre los 2,300 y 3,100 m.s.n.m., dentro de cada sitio se seleccionaron cuatro árboles con un diámetro ≥ 20 cm de diámetro a la altura del pecho. Se recabaron datos dasométricos tales como: diámetro a la altura del pecho, altura y exposición; asimismo datos generales como coordenadas, altitud, pendiente y distancia entre individuos.

Se extrajeron tres virutas (núcleos de crecimiento) por árbol a la altura del pecho (1.30 m) con un taladro de Pressler, el proceso consistió en seleccionar una parte sana y sólida en una sección del tronco. Para extraer la muestra (viruta), la barrena se ubicó en lo que se cree puede ser la médula (centro del árbol). Para realizar la extracción de la viruta, la punta de la barrena se presiona firmemente contra la corteza, colocada en ángulo recto (90°), perpendicular al tronco, y el mango se gira en el sentido de las manecillas del reloj. Una vez que la punta de la barrena se fija firmemente en la madera, sólo se necesita presión girando el mango (Grissino-Mayer, 2003).

Las muestras obtenidas fueron colocadas en popotes, con ventilación para propiciar el secado y debidamente etiquetados con la clave del sitio, número de árbol muestra; el número de muestras tomadas se identificaron con letras (A, B, C, etc.), orientación (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO), la fecha de colecta y complementado con datos adicionales del árbol, como coordenadas, elevación, presencia de incendios, pudriciones, etc.

5.4 Determinación del contenido de carbono

Posteriormente, tres de las muestras extraídas por árbol fueron introducidas en una estufa de secado durante dos días a 105°C. Una vez secas las muestras fueron observadas bajo microscopio estereoscópico y mediante un ligero pulido con lijas de grano fino (400, 600) fue posible observar con mayor claridad los anillos de crecimiento para poder realizar un conteo preliminar y seccionar las muestras cada diez años; el procedimiento siguiente fue triturarlas en un molino pulverizador con un tiempo aproximado de 6 minutos por muestra, depositándolas en bolsas de papel previamente identificadas.

Para determinar el contenido de carbono total (CT) las muestras fueron procesadas en el equipo analítico (Solids TOC Analyzer modelo 1010), el cual determina el CT en muestras sólidas mediante combustión completa a una

temperatura de 900°C, los gases productos de la combustión son medidos a través de un detector de infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en estos gases. El rango de detección del contenido de Carbono Total en las muestras va de 50 µg C a 30 mg C, considerando lo anterior se determinó un peso de muestra de 30 mg C para cada análisis.

Antes de iniciar el análisis de las muestras se procedió a calibrar el equipo analítico con un estándar de sacarosa al 30% con cuatro volúmenes de la solución (0, 10, 15 y 20 µL). Cada uno de los volúmenes se analizó con tres repeticiones, obteniendo un $R^2 = 0,9990$ en la recta de calibración. Una vez calibrado el equipo se desarrolló el análisis de las muestras, realizando tres repeticiones en cada uno de los análisis.

5.5 Análisis dendrocronológico

Para el fechado de las muestras (tres de las muestras extraídas por árbol) se prepararon mediante 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 hasta obtener una superficie en la que se aprecian las estructuras celulares; c) conteo preliminar de anillos de cada muestra, marcaje a lápiz de las decenas, cincuentenas y centenas; d) fechado y marcaje de cada muestra (décadas, medios siglos, siglos, microanillos, anillos falsos y anillos perdidos); e) medición de anillos de crecimiento individualmente utilizando un sistema de medición VELMEX, equipo compuesto por una platina deslizable y un codificador que tiene una precisión de medición de 0.001 mm, sistema integrado a un procesador PC y un estereomicroscopio con una retícula montada en el ocular para ubicar los límites de cada anillo de crecimiento. Posteriormente, las series de datos fueron sometidas a un control de calidad de fechado, la respuesta climática y la exactitud de la medición de cada anillo con el programa COFECHA. Una vez

verificada la calidad del fechado y la medición mediante COFECHA, se procedió a utilizar el programa ARSTAN el cual generó cronologías a partir de las series de anillos de crecimiento una vez fechados y medidos. Mediante dicho programa se estandarizó cada serie individual, removiendo la varianza debida a factores biológicos, como competencia y liberación y las geométricas (el área de fuste se incrementa con la edad y el crecimiento anual tiende a disminuir al distribuirse en una mayor superficie) no relacionadas con el clima (Fritts, 1976), se removieron con el programa ARSTAN el cual maximiza la varianza debida a factores ambientales que afecten a la población en conjunto (factores climáticos y atmosféricos).

5.6 Análisis de la información climatológica

Para determinar la asociación entre la variabilidad del clima y la variabilidad en el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* se consideraron los registros meteorológicos de las cuatro estaciones climáticas más cercanas en la región, tanto en distancia como en elevación: Galeana, Dieciocho de Marzo, El Potosí y los Mimbres, los datos fueron obtenidos a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Lo anterior para conocer el periodo de lluvia anual y temperatura que influye de manera significativa en el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii*.

Para la precipitación se obtuvieron correlaciones de la cronología utilizando los datos de cada una de las tres estaciones meteorológicas de manera individual así como un promedio simple regional. La estación meteorológica los Mimbres fue descartada en el proceso ya que mostró una correlación baja, por lo que sólo se trabajó con las estaciones Dieciocho de Marzo y Galeana. Los datos de los meses individuales que correlacionaron de manera significativa con el crecimiento fueron combinados (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 y los datos de contenido de carbono. En el caso de la temperatura los resultados de las correlaciones con los índices de crecimiento revelaron correlaciones bajas, siendo la estación meteorológica Galeana la que mostró las correlaciones más altas, pero aportó pocos datos (1945-1963).

Para determinar la asociación entre índices de crecimiento y el factor climático precipitación se seleccionó el periodo de 1975-2005, ya que los registros meteorológicos de las dos estaciones empleadas para la asociación empiezan a partir de 1975, mientras que para determinar la asociación entre índices de crecimiento y la temperatura se seleccionó el periodo 1945-1963.

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 la precipitación. Se reconstruyeron y analizaron, la precipitación regional de enero-julio y la temperatura máxima del periodo enero-abril. Posteriormente las reconstrucciones realizadas se correlacionaron con el contenido de carbono obtenido por decenio.

Para el caso de la temperatura, debido a las bajas correlaciones y la poca información meteorológica obtenida a través de la estación, se descartó la reconstrucción de la temperatura y la posterior correlación con los datos de contenido de carbono.

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, el crecimiento y el contenido de carbono, se graficaron los coeficientes de correlación entre los índices de crecimiento y el clima y posteriormente se graficaron con los datos analizados de contenido de carbono.

Para que el modelo de reconstrucción climática sea estadísticamente válido fue preciso desarrollar dos procesos; uno de calibración, realizando en la mitad de los datos climáticos disponibles y uno de verificación en la mitad restante, esto

se llevó a cabo a través de la subrutina VERIFY5 de la base de la Base de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés). La calibración es la asociación entre dos variables. En este caso el índice de la cronología de ancho de anillo es una variable y los datos promedio mensuales de precipitación representan los valores de la variable climática con los cuales el índice se calibrará. El éxito de la calibración se mide por el porcentaje de la variación que la variable independiente (índice de anillo total) explica de la variable dependiente reconstruida (precipitación). La verificación por su parte tiene como objetivo validar la reconstrucción, mientras que la calibración únicamente examina la relación entre ambas variables.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Obtención cronológica

Se obtuvo una serie maestra para los datos de crecimiento anual, a través del análisis de 163 núcleos de crecimiento. Desarrollando de esta manera una cronología de ancho total de anillo de 143 años, que corresponden al periodo de 1868-2010. Resultados similares fueron los registrados por Arreola *et al.* (2010) para el cerro El Potosí al datar 144 años, para los individuos de esta zona.

El programa detectó sólo dos segmentos de un total de 399 con posibles problemas en toda la serie maestra. Lo anterior es indicativo, de que además de presentar una alta correlación entre las muestras, el proceso de conteo, identificación de anillos falsos o perdidos y la asignación de fechas se realizó con precisión (Tabla 1). La longitud media de edad en años fue de 66, lo cual indica que se trata de una población joven, presentándose pocos individuos de edad mayor a 100 años. En un estudio realizado en la misma zona se registró una longitud media de edad de 82 años (Arreola *et al.*, 2010), siendo superior por 16 años a la edad media registrada en el presente estudio. Como se mencionó con anterioridad la cronología de ancho total de anillo (Fig. 3) tuvo una intercorrelación entre series alta ($r= 0.71$, $p<0,05$), lo cual muestra que existe una respuesta climática común (Holmes, 1983). De acuerdo a estudios realizados en diversas partes del norte de México, el valor promedio que presenta *Pseudotsuga menziesii* en cuanto a la intercorrelación entre series es de 0.75 (Constante *et al.*, 2010), por consiguiente el resultado obtenido en el presente trabajo se muestra satisfactorio en relación a los valores promedio que suele presentar la especie, ya que se obtuvo una intercorrelación entre series alta de 0.71. Una intercorrelación superior fue la obtenida por Arreola *et al.* (2010) para esta misma región al registrar un valor de 0.79.

De acuerdo con las estadísticas descriptivas para diferentes cronologías de anillos de crecimiento de esta especie en diferentes sitios del norte y centro de México, la autocorrelación de primer orden para la especie tiene un rango entre 0.05 a 0.49 para la Sierra Madre Oriental, mientras que para la Sierra Madre Occidental y el Valle de México de registran rangos entre 0.03 a 0.39 (Villanueva *et al.*, 2008). En general presenta un valor promedio de 0.35 en cuanto a este criterio dendrocronológico (Constante *et al.*, 2010). En el presente trabajo se obtuvo una autocorrelación de primer orden de 0.51, una autocorrelación alta para los valores promedios registrados para la especie; lo anterior muestra la elevada tendencia de la especie a producir crecimientos similares de un año a otro.

Tabla 1. Resumen de resultados de COFECHA para ancho total de anillo de la serie de crecimiento del cerro El Potosí.

Ancho total de anillo	
Número de series fechadas	163
Serie maestra	1868-2010
Total de anillos medidos	10,739
Anillos perdidos	28
Intercorrelación entre series	0.715
Sensibilidad media	0.447
Autocorrelación de primer orden	0.506
Segmentos con posibles errores	2 de 399
Longitud media (años)	66

En relación a la sensibilidad media de acuerdo a los análisis estadísticos se obtuvo un valor de 0.45, ligeramente superior a los rangos para diferentes cronologías de *Pseudotsuga menziesii* en diversos sitios de la Sierra Madre Oriental (0.23-0.38), Sierra Madre Occidental (0.13-0.34) y Valle de México (0.21-0.35), lo cual indica que la respuesta climática de la especie depende más de las condiciones del sitio donde se desarrolla, que de las condiciones climáticas de la región misma (Villanueva *et al.*, 2008).

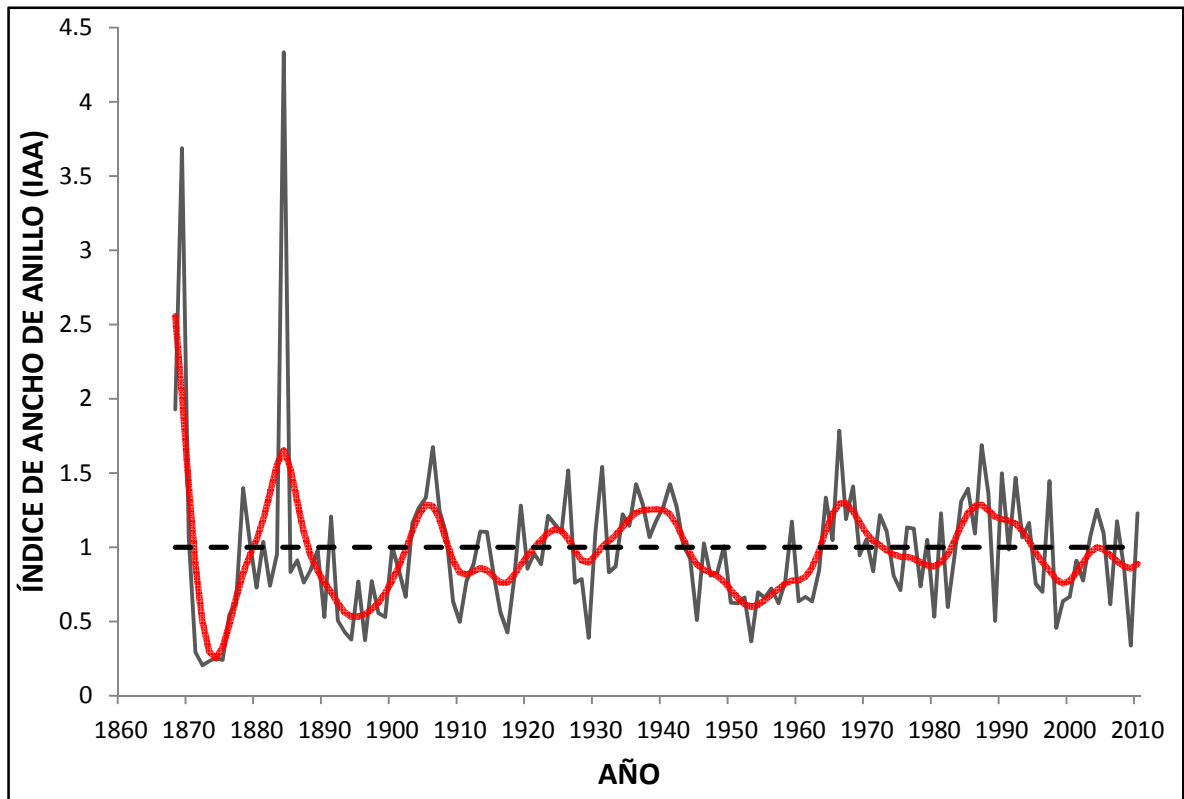


Figura 3. Cronología estándar de ancho total de anillo de *Pseudotsuga menziesii* para el cerro El Potosí.

6.2 Correlación crecimiento-precipitación

Las correlaciones más altas entre el índice de crecimiento de la cronología y la precipitación total, fueron para las estaciones de Dieciocho de Marzo y Galeana, por lo tanto se descartaron las estaciones de Mimbres y El Potosí. En relación a los meses individuales las correlaciones más altas corresponden a mayo y abril para Dieciocho de Marzo, mientras que abril y enero lo fueron para Galeana; en relación a la correlación por periodos estos fueron enero a abril seguido por enero a mayo (Dieciocho de Marzo) y enero a julio seguido por enero a junio (Galeana). Posteriormente se realizaron correlaciones regionales para elevar las mismas, con las que se lograron mejores resultados, obteniéndose una correlación regional de las estaciones Dieciocho de Marzo y Galeana, encontrando una respuesta significativa con la precipitación estacional enero-julio, periodo 1975-2005 (Fig. 4) con una correlación de $r= 0.71$ ($p<0,001$). La correlación obtenida fue similar a la registrada por Cerano *et al.* (2009) de 0.74 en el norte de México (Chihuahua).

La precipitación regional total de enero a julio, resultó ser el factor que mejor explica la variabilidad en los índices de crecimiento, explicando un 51% de la variación total en el crecimiento radial de la especie.

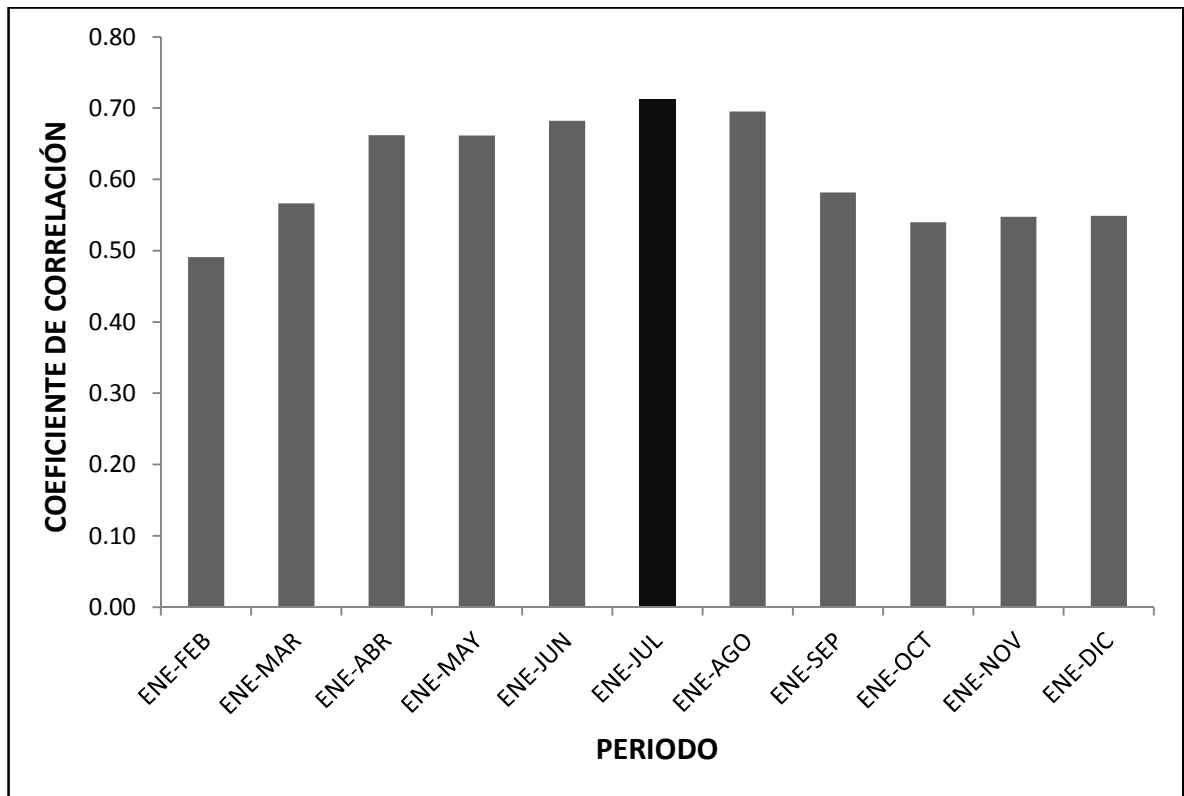


Figura 4. Coeficiente de correlación entre índice de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* y los registros de precipitación para el periodo 1975-2005 de las estaciones climáticas Dieciocho de Marzo, Galeana y Mimbres.

La alta correlación de los índices de crecimiento con el periodo de precipitación invierno-primavera principalmente y los primeros meses del verano, significa que el crecimiento depende principalmente de las precipitaciones durante estos meses; esta precipitación es generalmente de baja intensidad y normalmente no supera la infiltración fundamental, permitiendo que el agua se almacene en los primeros horizontes del suelo y se utilice para el crecimiento del árbol, aunado a los suelos delgados o poco profundos que no almacenan mucha agua durante la fase tardía del crecimiento del año anterior; entonces, estos suelos contienen humedad durante, o inmediatamente después, de presentarse las precipitaciones de invierno. Lo anterior coincide con los estudios de González

(2003), Villanueva *et al.* (2007) y Arreola *et al.* (2010) en estudios realizados para el norte y noreste de México. De igual manera es reconocido que entre los factores climáticos, la precipitación invernal es el principal factor ambiental que influye de manera directa en el crecimiento radial de la vegetación del norte de México, independientemente de las condiciones locales (González *et al.*, 2005; Arreola *et al.*, 2010). Esto a diferencia de las precipitaciones de verano y otoño que son de mayor intensidad, ya que es durante los meses de agosto y septiembre que se presenta la mayor cantidad de precipitación en la región, Arreola *et al.* (2010) mencionan que posiblemente la velocidad de toma del agua por las raíces de los árboles no es tan rápida como la evaporación o percolación del agua de lluvia que se presenta. Además, estas lluvias se presentan a finales de verano, cuando queda poco tiempo para producir biomasa debido al inicio del invierno y la consecuente iniciación de la dormancia.

6.3 Correlación crecimiento-temperatura

En esta parte del proceso de análisis se obtuvieron las correlaciones entre el periodo de temperatura que más influye en el crecimiento de los árboles. Las correlaciones se elaboraron con las estaciones de El Potosí, Galeana, Dieciocho de Marzo y Mimbres, obteniendo bajas correlaciones y mayormente negativas para las estaciones de El Potosí, Dieciocho de Marzo y Mimbres. La estación Galeana fue la que registró las correlaciones más altas en relación a las otras estaciones. Se obtuvieron las correlaciones por meses individuales y posteriormente para aumentar los coeficientes de correlación, se realizó una correlación por periodos, obteniendo las correlaciones más altas para los meses de abril, enero, noviembre y diciembre; mientras que las correlaciones por periodo corresponden de enero a abril, enero a mayo y enero a junio. Se seleccionó el periodo de enero a abril ya que fue para el cual se obtuvo la correlación más alta (0.36), pero no se encontró una respuesta significativa $r=$

0.29 ($p > 0,05$), ya que la temperatura del periodo enero-abril sólo explica el 8.4% de la variación total en el crecimiento radial de la especie (Fig. 5).

Los resultados anteriores no sugieren un potencial adecuado para la reconstrucción de temperatura (González, 2003); sin embargo, sugieren un potencial adecuado para la reconstrucción de la precipitación.

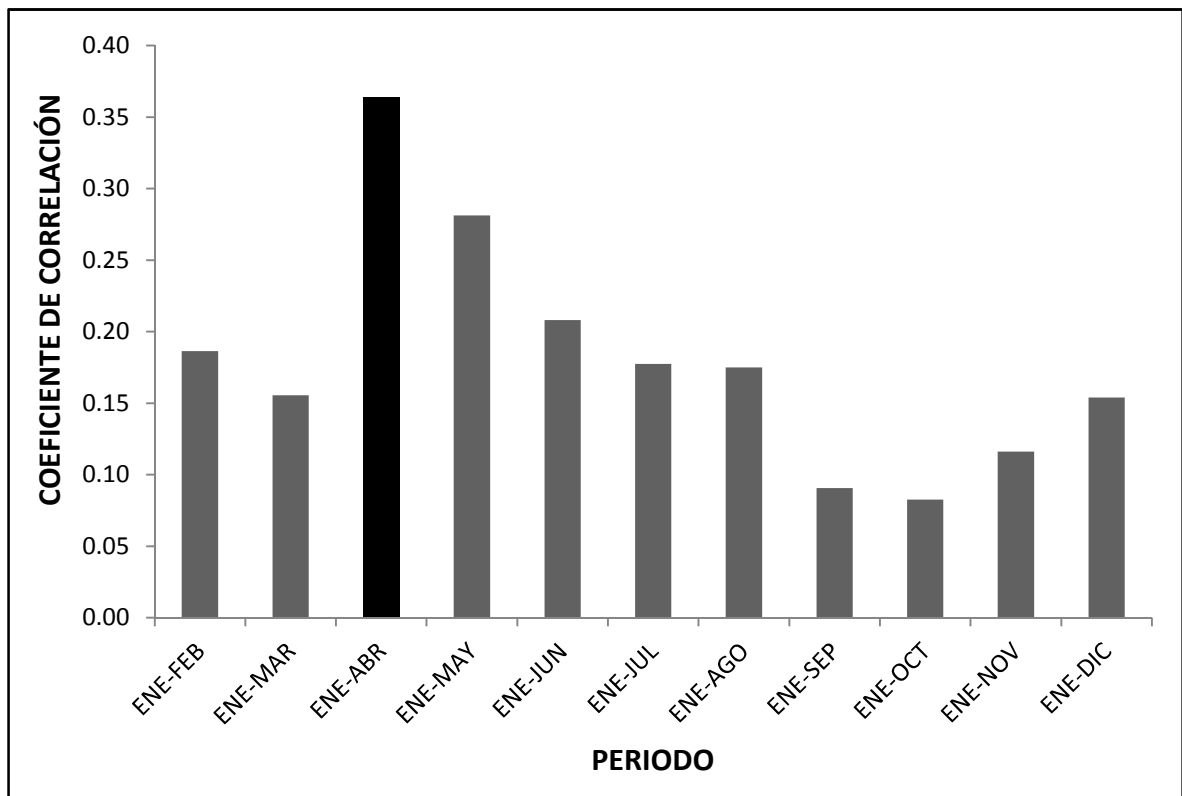


Figura 5. Coeficiente de correlación entre índice de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* y los registros de temperatura para el periodo 1975-2005 de las estaciones climáticas Dieciocho de Marzo, Galeana y Mimbres.

6.4 Calibración y verificación

Para que un modelo de reconstrucción sea estadísticamente válido, es preciso desarrollar dos procesos; uno de calibración, realizado en la mitad de los datos climáticos disponibles, y uno de verificación en la mitad restante. La calibración

es la asociación entre dos variables. En este caso el índice de la cronología ancho de anillo es una variable y los datos promedio mensuales de precipitación representan los valores de la variable climática con los cuales el índice se calibrará. El éxito de la calibración se mide por el porcentaje de la variación que la variable independiente (índice de anillo total) explica de la variable dependiente reconstruida (precipitación). Por otro lado la verificación tiene como objetivo validar la reconstrucción, mientras que la calibración únicamente examina la relación entre ambas variables.

Los resultados del modelo indican una correlación de $r = 0.73$ ($r^2 = 0.53$, $p < 0,001$) entre la precipitación observada y la precipitación reconstruida, y explica el 53% de la variabilidad de la precipitación para el periodo de verificación. La calibración presentó una correlación de $r = 0.73$ ($r^2 = 0.53$, $p < 0,001$) y explica el 53% de la variabilidad (Fig. 6).

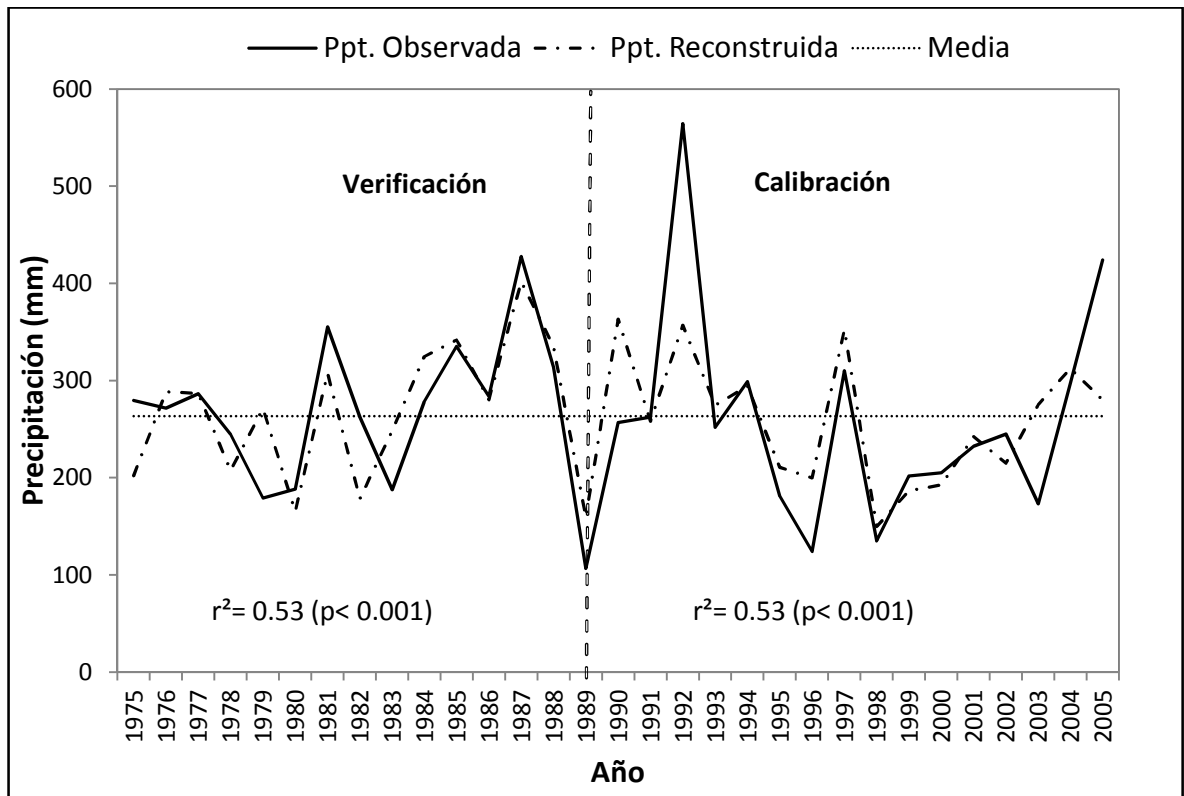


Figura 6. Verificación y calibración del modelo utilizado para la reconstrucción de la precipitación (Ppt) que incluyó el periodo total de datos (1975-2005).

Debido que los subperiodos utilizados tanto para realizar la calibración como la verificación del modelo entre la precipitación observada y reconstruida estuvieron correlacionados significativamente, se utilizó todo el periodo de datos climáticos disponibles (1975-2005) para generar la ecuación de reconstrucción que mostró una $r = 0.712$ ($r^2 = 0.508$, $p < 0,001$). Las tablas 2 y 3 muestran los datos estadísticos del modelo lineal utilizado para la reconstrucción estacional de la precipitación invierno-primavera.

Tabla 2. Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno-primavera.

Periodo	R^2	Coefficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1975-2005	0.508	a 56.1601	39.74	1.41	0.168
		b 204.7519	37.42	5.47	0.000

Tabla 3. Análisis de varianza del modelo de regresión.

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	f	p
Regresión	136432.7	1	136432.7	29.94019	0.000007
Residual	132148.4	29	4556.8		
Total	268581.1				

La subrutina VERIFY5 de la base de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés), indicó que tanto la calibración como la verificación pasaron la prueba de significancia ($p < 0,05$) para la correlación, reducción de error, valor de "t" y primera diferencia significativa. El modelo de regresión obtenido para el periodo 1975-2005 se consideró estadísticamente válido para reconstruir el periodo total de la serie dendrocronológica.

El modelo lineal bivariado utilizado fue el siguiente:

$$Y_t = 56,1601 + 204,7519 * X_t$$

Donde: Y_t = valor de precipitación reconstruido enero-julio para un año específico (mm) y X_t = índice de ancho de anillo total.

6.5 Reconstrucción y análisis de tendencia de factores climáticos

El modelo utilizado para la reconstrucción incluyó el periodo total de datos disponibles (1975-2005) y los índices de anillo total para el mismo periodo. Los resultados del modelo indican una correlación de $r=0.712$ ($r^2=0.508$, $p<0,001$) entre la precipitación observada y la precipitación reconstruida (Fig. 7 y 8). Una vez aplicado el modelo, éste se calibró con datos del subperiodo 1989-2005 y se verificó en el subperiodo 1975-1988.

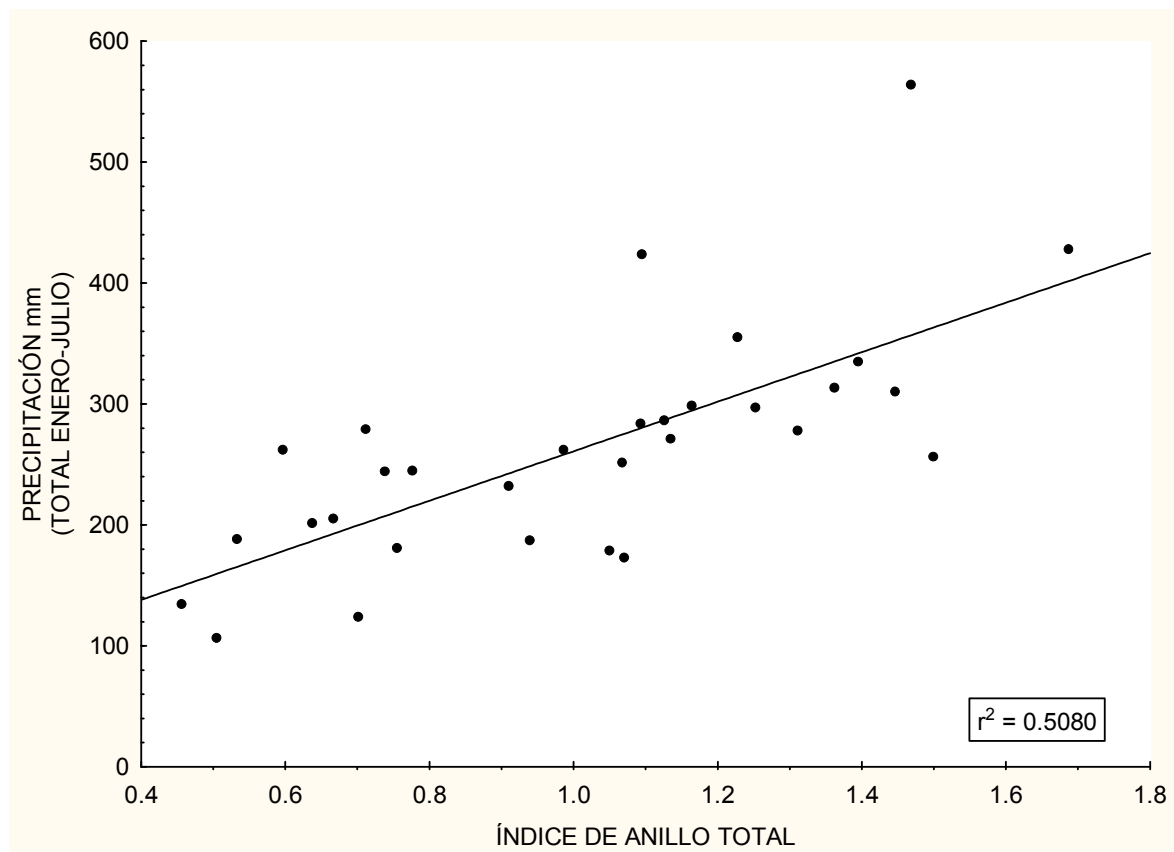


Figura 7. Gráfico de dispersión del modelo regresión lineal que muestra la variabilidad de la cronología de anillo total con la precipitación total de enero-julio, periodo 1975-2005.

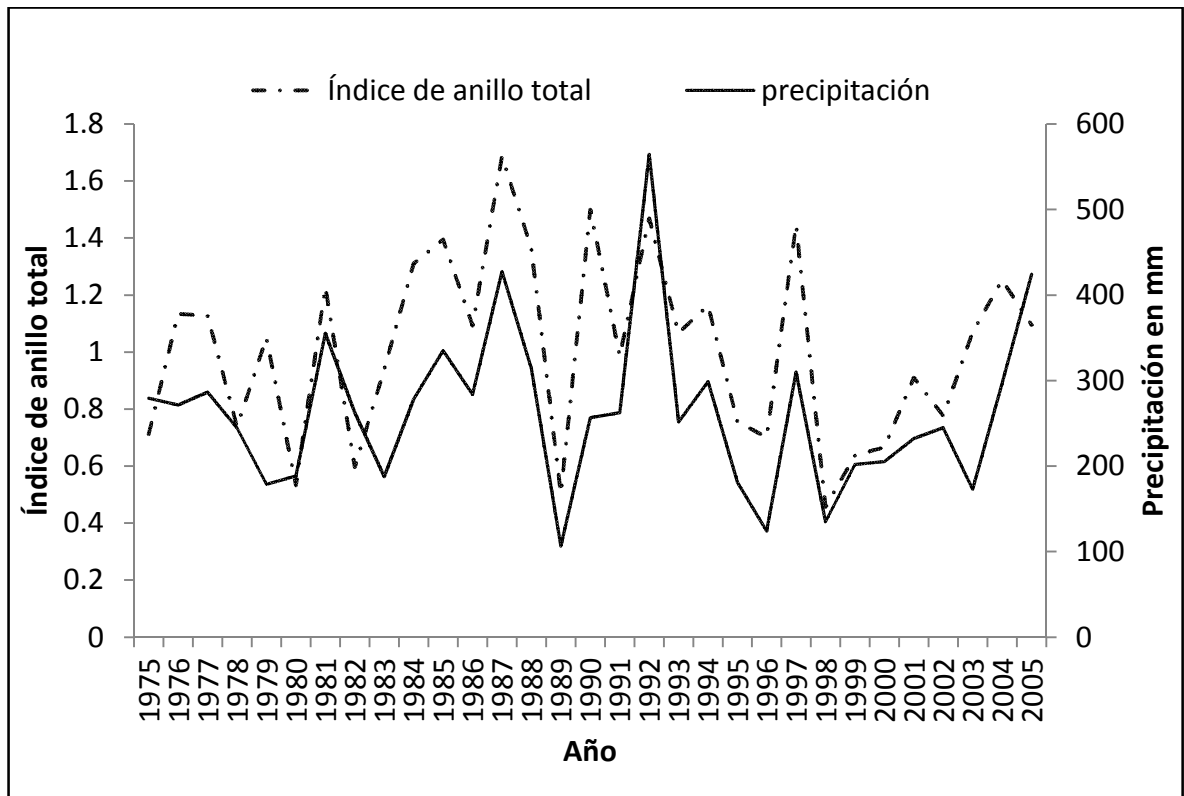


Figura 8. Asociación entre el índice de anillo total y precipitación estacional observada para el periodo enero-julio, periodo 1975-2005.

6.6 Análisis de la variabilidad climática

La reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el área natural protegida cerro El Potosí, muestra una variabilidad climática decenal, entre los periodos secos y húmedos registrados (Fig. 9). Excepto por el periodo entre 1940-1960, en el que se registró una sequía severa para el noreste de México (Cerano *et al.*, 2009; Arreola *et al.*, 2010), a lo cual le sucedió un periodo prolongado de humedad de 1962-1972; sin embargo, posterior a la década de los 20, tanto los periodos secos como los periodos húmedos muestran variación en frecuencia y duración de los eventos, presentándose periodos secos de mayor duración y eventos húmedos de menor intensidad.

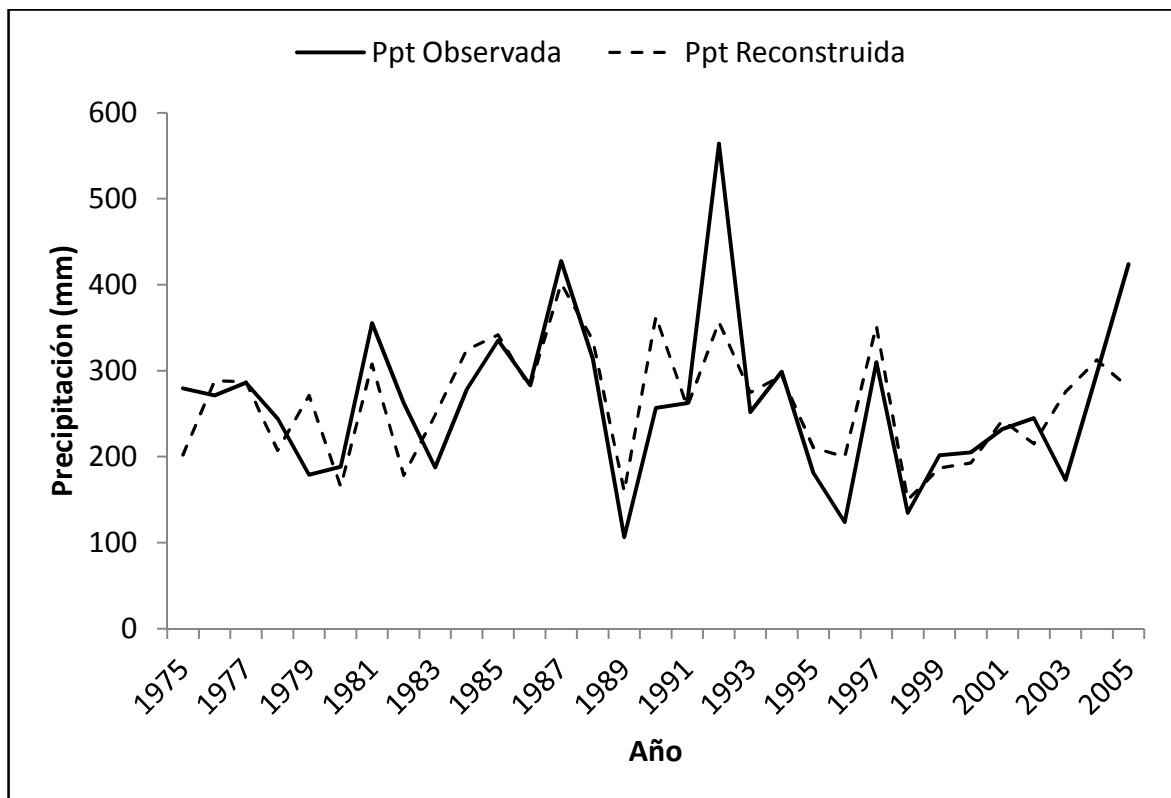


Figura 9. Precipitación observada (línea sólida) y reconstruida (línea punteada) para el periodo estacional enero-julio, periodo 1975-2005.

Sequías severas se reconstruyeron para los periodos de 1870-1878, 1887-1901, 1908-1919, 1927-1929, 1943-1962, 1974-1981, 1994-2002 y 2006-2010. Las sequías más prolongadas ocurrieron en los periodos 1887-1901, 1908-1919 y 1943-1962. Lo anterior coincide con estudios realizados en el norte del país, como los de Villanueva *et al.* (2008), Cerano *et al.*, (2009) y Arreola *et al.* (2010), quienes registraron esta última sequía severa que se prolongó por 19 años. A diferencia del estudio realizado por Cerano *et al.*, (2009) en el suroeste de Chihuahua, en el que registraron un periodo de sequía de 1924-1941, éste no se registró para la zona estudiada.

En relación a los periodos de humedad se reconstruyeron 6 eventos para los años de 1879-1887, 1901-1908, 1920-1926, 1962-1971, 1931-1943, 1982-1993,

siendo el periodo de 1931-1943 el de mayor duración; evento registrado también por Villanueva *et al.*, (2006) en el estudio realizado para el noreste de México; al igual que los eventos de 1879-1887 y 1982-1993.

Se observa que posterior a periodos de humedad prolongados, se presentan periodos de sequía intensos, de tal manera que los resultados indican que actualmente la región se encuentra bajo un periodo de sequía que inició aproximadamente en 2006 y que dicho evento se presentó consecutivo a la sequía de 1994-2002. Es decir, que el intervalo que se había estado presentando de alrededor de 10 años entre los eventos húmedos y secos, disminuyó lo últimos años a 4 años entre la última sequía y la sequía que se presenta actualmente (Fig. 10).

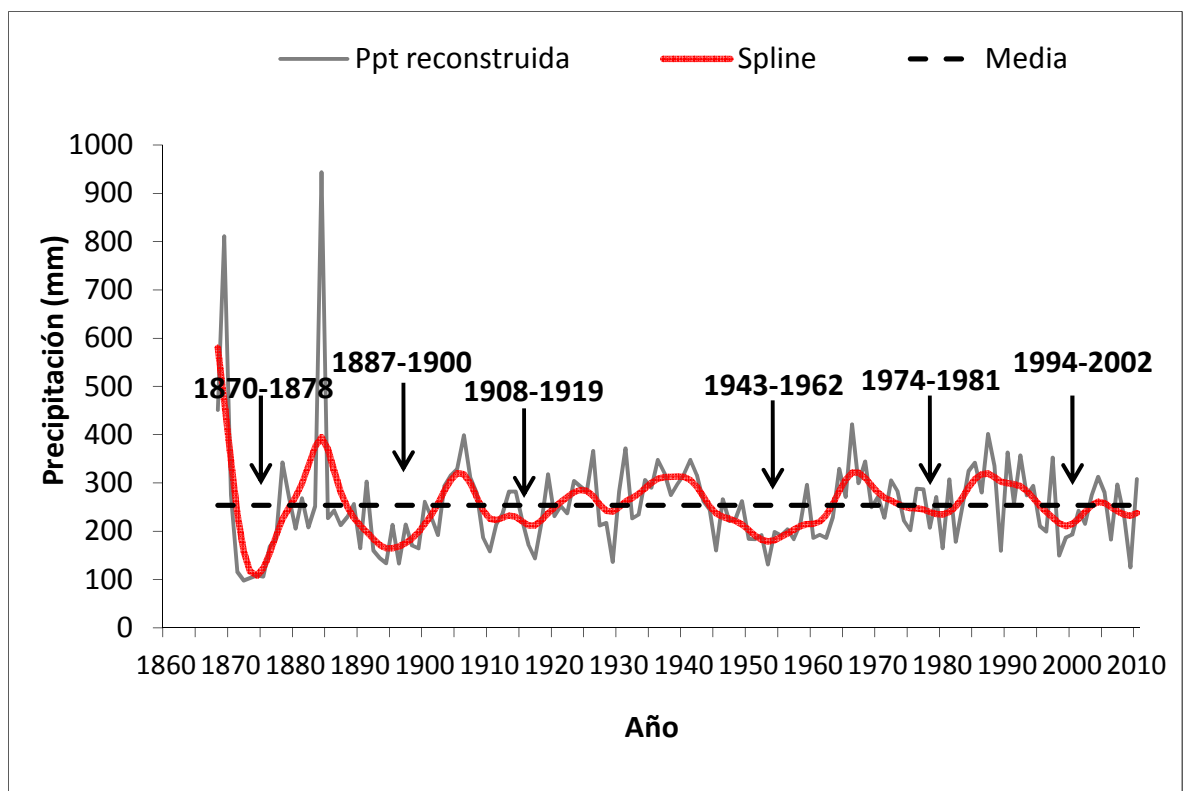


Figura 10. Reconstrucción regional de precipitación estacional (enero-julio) para el cerro El Potosí

6.7 Captura de carbono

El análisis de captura de carbono de la especie se realizó por decenio, es decir, se hizo la preparación de las muestras para cuantificar el carbono por cada diez años, analizando un total de 50 muestras con tres repeticiones cada una. Se logró cuantificar el contenido de carbono para las décadas de 1920-1929, 1940-1949, 1960-1969, 1980-1989 y 2000-2009 (Tabla 4). Se decidió realizar un intercalamiento entre décadas para tener márgenes más amplios de tiempo y de esta manera observar con mayor claridad los posibles cambios a través del tiempo en el contenido de carbono de la especie. Se decidió realizar el análisis de 50 muestras ya que conforme aumentaba el número de repeticiones no se observaron diferencias significativas entre las décadas analizadas. Se obtuvieron valores entre 47% y 49% de carbono total capturado, valores similares a los reportados en la literatura (Koch, 1989; Husch, 2001), que mencionan que aproximadamente 50% de la biomasa del individuo es carbono. La FAO (2000), por otra parte, menciona que la vegetación de los bosques contiene entre 42% y 48% de carbono en la biomasa seca. Específicamente para la especie *Pseudotsuga menziesii*, la CONAFOR (2008) reporta un valor de 46.76% de contenido total de carbono. Como se mencionó con anterioridad, los valores obtenidos fueron similares a los reportados en la literatura, sin embargo a través de 90 años analizados no se presentaron diferencias significativas en los valores resultantes para cada década. Hasta el momento no se han realizado estudios sobre cambios en el contenido de carbono, por lo tanto no es posible realizar comparaciones con estudios previos.

Tabla 4. Porcentaje de carbono capturado por década.

Década	Porcentaje de carbono capturado
1920-1929	48.88
1940-1949	49.36
1960-1969	49.10
1980-1989	48.38
2000-2009	47.88

6.8 Correlación crecimiento-captura de carbono

Se estimó el contenido de carbono por decenio en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*, obteniendo como resultado que no existe un incremento en el contenido de carbono capturado a través del tiempo, de la misma manera no se encontró una respuesta positiva entre las variables CC-AA (Fig. 11). El contenido de carbono capturado en los últimos 90 años no presentó muchas fluctuaciones, sólo en la década de 1940-1949 mostró un ligero incremento, el cual no se identifica con algún periodo de humedad en esos años, al contrario se encuentra dentro del periodo de 1943-1960 que es uno de los periodos de sequía más severos registrados para la región (Arreola *et al.*, 2010). Las siguientes décadas de 1960 al 2009 se registraron valores estables ya que no hubo muchas fluctuaciones, el valor es relativamente bajo en comparación de la década de 1940-1949, pero los cambios no son significativos.

El promedio de ancho de anillo total tiene fluctuaciones importantes, mostrando un incremento importante de anchura de anillo en la década de 1960-1969. Lo cual coincide con periodos de precipitación por encima de la media para la región (Villanueva *et al.*, 2006), sin embargo este crecimiento no tuvo relación con la cantidad de carbono capturado durante esa década, ya que no hubo aumento en la captura de carbono durante este periodo. Posteriormente

desciende en el periodo de 2000-2009, lo cual de igual manera coincide y está asociado con eventos secos, específicamente con la sequía de 1994-2002 (Cerano *et al.*, 2009; Arreola *et al.*, 2010), continuando de nuevo en 2005-2008 a la fecha. El periodo de 1920-1929 también muestra un incremento en el ancho de anillo lo cual corresponde con un periodo de humedad para la región, pero que no fue registrado por otros autores en estudios realizados para el norte de México. Excepto por la década de 1980-1989, donde se observa una disminución en el ancho de anillo, lo cual no corresponde con el periodo de humedad registrado para esta década (1984-1993) en este estudio y por Villanueva *et al.*, (2006). En la mayoría de los casos las disminuciones en el crecimiento durante las décadas analizadas se relacionan en primera instancia, con sequías.

Tanto en el índice de ancho de anillo, es decir en el crecimiento de la especie, como en la cantidad de carbono capturado por la misma, no se observaron cambios que pudieran atribuirse a un efecto de fertilización por CO₂, algunos autores han mencionado que el aumento de CO₂ puede funcionar como un potenciador del crecimiento (Le Marche *et al.*, 1984; Reynolds *et al.*, 1992; Graybill e Idso, 1993; Allen y Amthor, 1995; Wullschleger *et al.*, 1995; Jacoby y D'Arrigo, 1997), ya que diversos autores han referido que mediante un aumento en las concentraciones de CO₂ se pueden presentar efectos como incremento en el crecimiento, debido a un aumento de las tasas fotosintéticas, área foliar, duración del área foliar y un uso más eficiente del agua (Isebrands *et al.*, 2001), sin embargo, en este trabajo no se encontraron evidencias que esto esté sucediendo en la montaña más alta del estado. Körner (2003) por ejemplo menciona que una mayor producción de fotosintatos se introduciría en canales metabólicos diferentes de la síntesis de nueva biomasa por ejemplo mayor gasto respiratorio, es decir que un aumento en la concentración de CO₂, no necesariamente representa un aumento en el crecimiento consecuente de un aumento de biomasa en los individuos, sino que los procesos metabólicos son

tan complejos, que podría estar afectando de manera distinta en el organismo de las especies aunado al complejo de relaciones ambientales que influyen en su desarrollo, como lo son la disponibilidad de agua, nutrientes, luminosidad, temperatura, etc. (García, 2003). Una de las maneras en las cuales se dice que podría tener un efecto es en el manejo eficiente del agua en las especies (Isebrands *et al.*, 2001), lo cual se podría traducir, como menciona Adams (2007), en menor susceptibilidad a la sequía.

Como mencionan diversos autores, el crecimiento o aumento de biomasa vegetal es uno de los principales bioindicadores para detectar posibles respuestas al cambio climático (Spiecker, 1999; Hughes, 2000). No obstante, al igual que en estudios previos no se encontraron respuestas en los anillos de crecimiento por un incremento en la concentración de CO₂ atmosférico debido al cambio climático (Kienast y Luxmoore, 1988; Graumlich, 1991; García 2003; González, 2003). Los estudios de García (2003) y González (2003) que son los desarrollados para el norte de México, mencionan que no existen evidencias o tendencias en el crecimiento de las especies forestales, ya que probablemente en caso de estarse presentando este efecto la complejidad del sistema natural donde se desarrollan lo atenúa, esto en caso de que existiese o que por otra parte los anillos de crecimiento no respondan al mismo.

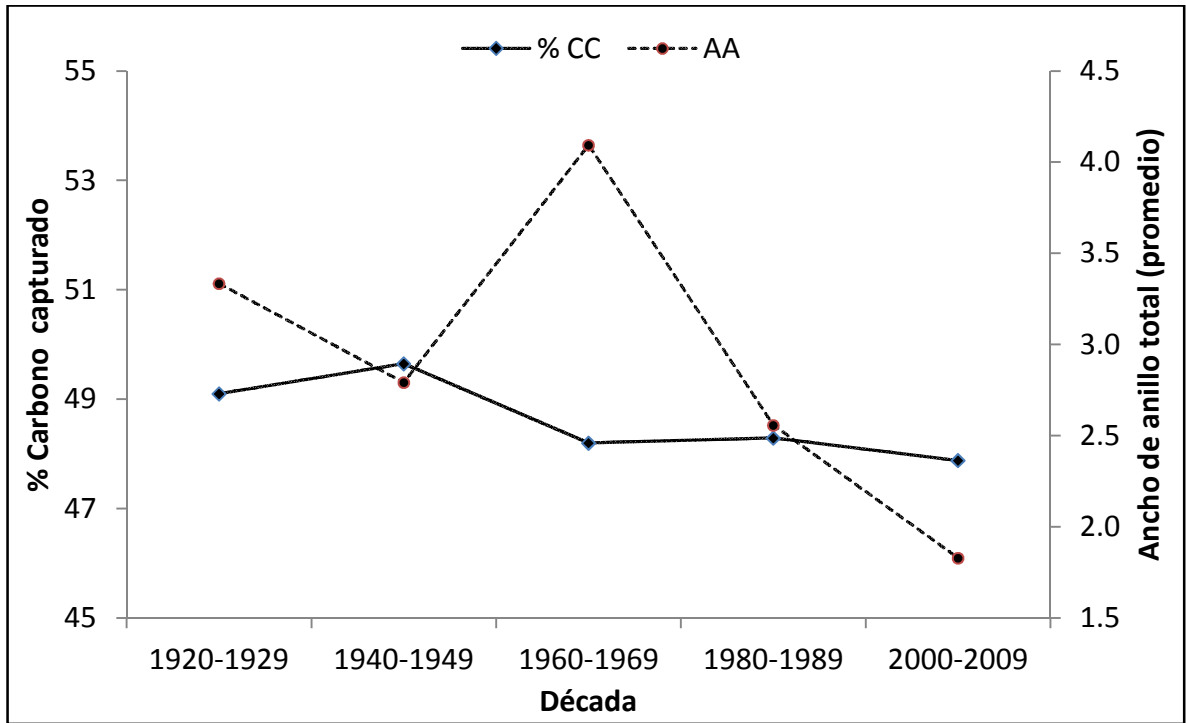


Figura 11. Relación entre el porcentaje de carbono capturado (CC) a través del tiempo y ancho de anillo total (AA).

7. CONCLUSIONES

Se obtuvieron correlaciones positivas entre la variable precipitación e índice de anillo total. Mientras que para la variable temperatura no se obtuvieron buenas correlaciones, concluyendo con lo anterior que el factor más importante que determina el crecimiento de la especie en el área de estudio es la precipitación.

Por consiguiente se generó la cronología a través de la cual se reconstruyó la precipitación regional mediante el ancho de anillo total para el cerro El Potosí, determinando que está ligada significativamente con la precipitación invierno-primavera y mediante la cual se reconstruyeron periodos importantes de sequía y de humedad para la región. A través del análisis de los anillos de crecimiento fue posible observar un aumento en la variabilidad climática en los últimos años, por lo que se detectó que el intervalo de tiempo entre los eventos secos y húmedos se ha modificado en la región, presentándose de manera más consecutiva y probablemente se lleguen a presentar con mayor intensidad.

En relación a la determinación de contenido de carbono los resultados indicaron que no existe un incremento en el contenido de carbono capturado en los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en los últimos 90 años, asimismo no se encontró un incremento en los anillos de crecimiento que indiquen el efecto del cambio climático debido al aumento de CO₂ atmosférico. Es decir que a pesar de existir un aumento en la cantidad de gases de efecto invernadero, entre ellos el más importante, el CO₂, tanto en el contenido de carbono como en el ancho de los anillos de crecimiento no se detectó evidencia de que tal efecto esté causando un cambio en el crecimiento de la especie. Al no encontrar una relación positiva entre el contenido de carbono y los anillos de crecimiento, no fue posible realizar las correlaciones entre las variables climáticas: precipitación y temperatura, con la variable contenido de carbono.

No se obtuvieron correlaciones positivas entre el carbono capturado y el ancho de anillo total. No obstante, a través de los registros climáticos existentes y la información dendrocronológica obtenida, fue posible extender el conocimiento de la variación climática a nivel regional, contribuyendo de esta manera al entendimiento del comportamiento histórico del clima.

Son más evidentes los efectos del cambio climático a través de las variables climáticas, que cambios en la cantidad de carbono que están capturando los individuos, de tal manera que el efecto de la variabilidad climática es realmente el que da lugar a los cambios en los anillos de crecimiento a través del tiempo. Por consiguiente, la tendencia actual de cambio climático pudiera favorecer eventos climáticos extremos y de mayor frecuencia y afectar la variabilidad hidroclimática histórica, por lo cual es fundamental explicar los eventos climáticos a nivel regional para modelar posibles escenarios de clima.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Achard, F., H.D. Eva., H.J. Stibig, A. Belward. 2004. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990's. *Glob Biogeochem. Cycles* 18: GB2008, doi: 10.1029/2003GB002142.
- Adams, J. 2007. The direct carbon dioxide effect on plants. *In: Vegetation-Climate Interaction*. Springer Berlin Heidelberg. Pp. 191-226
- Allen, L. H. y J. S. Amthor. 1995. In Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?, eds. Woodwell, G. M. & Mackenzie, F.T. (Oxford Univ. Press, New York), pp. 51–84.
- Arreola O., M.R., M. Gonzalez-Elizondo, J.J. Návar-Cháidez. 2010. Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. *Madera y Bosques* 16(1): 71-84.
- Arvizu, J.L. 2004. Registro histórico de los principales países emisores. *In: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.)*. Cambio Climático una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp. 99-107.
- Avalos G., M. 2004. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, PICC. *In: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.)*. Cambio Climático una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp. 123-142.
- Bazzaz, F.A. 1990. The response of natural ecosystems to the rising global CO2 levels. *Annual Review of Ecology and Systematics* 21:167-196.
- Biondi, F., P.C. Hartsough and I. Galindo E. 2005. Daily Weather and Tree Growth at the Tropical Treeline of North America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, (37)1: 16–24.

- Brienen, R.J.W. and P.A. Zuidema. 2005. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. *Oecologia* 146: 1–12.
- Bugmann, H., C. Bigler. 2011. Will the CO₂ fertilization effect in forests be offset by reduced tree longevity? *Oecologia* 165:533-544.
- Carrer, M. and C. Urbinati. 2004. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix deciduas* and *Pinus cembra*. *Ecology*. 85:730-740.
- Carrillo A., F., E. Buendía-Rodríguez, M. Acosta-Mireles, T. Hernández-Tejeda. Captura de Carbono en áreas arboladas. 2008. *In*: Guerra de la C., V y C. Mallén R. (Comp.). Tlaxcala sus recursos forestales: conservación, aprovechamiento y bases para su manejo. INIFAP/CENID COMEF.CONACYT. México, D. F. México. Libro Técnico Núm. 4. pp. 170-180.
- Cerano-Paredes, J. J. Villanueva-Díaz, P. Z. Fulé, J.G. Arreola-Ávila, I. Sánchez-Cohen, R. D. Valdez-Cepeda. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15(2):27-44.
- Cleaveland, M.K., D.W. Stahle, M.D. Therrell, J. Villanueva, B.T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2008. Catálogo de contenido de carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México. Comisión Nacional Forestal. Coordinación de Educación y Desarrollo Tecnológico. Gerencia de Desarrollo y Transferencia de Tecnología. Zapopan, Jalisco. www.conafor.gob.mx.

- Conde-Álvarez, C. y S. O. Saldaña-Zorrilla. 2007. Cambio climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Revista Ambiente y Desarrollo* 23(2): 23-30.
- Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., J. Estrada A. 2010. Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto Técnico No. 19. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 40 p.
- Cruz Z., A.R. 2007. Cambio climático, Protocolo de Kyoto y bonos del carbono. *Rev. Comercio Exterior*. 57(5): 416-424
- Cuatecontzi, D.H., J. Gasca. 2004. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. *In: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.)*. Cambio Climático una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp. 87-98.
- D'Arrigo, R., R. Wilson, B. Liepert, P. Cherubini. 2008. On the Divergence Problem in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change* (60): 289-305.
- D'Arrigo, R. *et al.* 2007. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Glob. Planet. Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.03.004.
- Díaz C., S.C. 2002. Paleoclimatología del noroeste mexicano. Tesis doctoral. Uso y preservación de los recursos naturales. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur. 71 p.
- Díaz, S.C., M.D. Therrell, D.W. Stahle, M.K. Cleaveland. 2002. Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647–1992. *Climate Research* 22: 237–244.

Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton *et al.*, 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* (263): 185-190.

Domínguez. 1994. Análisis histórico-ecológico de los bosques de *Pseudotsuga* en México. INIFAP, Centro de Investigación del Golfo-Centro, Campo Experimental “El Palmar”, Veracruz, México. Folleto Técnico 23. 43 p.

FAO, 2001. Climate Change and Forests, State of the World Forests. FAO Corporate Document, 21p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. *In: Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 88*. Roma. 98 p.

Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, England.

García M., G.E. 2003. Efecto del incremento en la concentración de CO₂ atmosférico sobre los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.), en Nuevo León, México. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L. 53 p.

Gay, C. 2000. El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. *Gaceta UNAM* 3411: 12-13.

Goldsmith, G.J. 2006. Climate Change and Global Security. En: B. Di Bartolo and O. Forte (eds.), *Advances in Spectroscopy for Lasers and Sensing*. Pp. 515–538.

González E., M. 2003. Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la Sierra Madre Occidental, México. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L. 193 p.

González E., M., E. Jurado, S. González E., O. Aguirre C., J. Jiménez P., J. Nívar. 2003. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. Ciencia UANL 6(3): 377-385.

González E., M. E. Jurado, J. Nívar, M.S. González E., J. Villanueva, O. Aguirre, J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681-2001 rain reconstruction. Forest Ecology and Management 213: 39-53.

Graumlich, L.J. 1991. Subalpine tree growth, climate, and increasing CO₂: An assessment of recent growth trends. Ecology 72(1):1-11.

Graybill, D.A. y S.B. Idso. 1993. Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring chronologies. 1993. Global Biogeochemical Cycles 7(1): 81-95.

Grissino-Mayer, H. 2003. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. Tree-Ring Research 59(2):63-79.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Reporte Técnico V del IPCC. 85 p.

Guzmán, A., I. Laguna, J. Martínez, 2004. Los Mecanismos Flexibles del Protocolo de Kyoto de la Convención Macro de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Cambio Climático una visión desde México, Instituto de ecología Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp. 177-178.

Hermann, R.K., D.P. Lavander. 1990. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Douglas fir in Burns, R.B., Honkala, B.H. (technical coordinators), Silvics of North America: 1. Conifers (Agriculture Handbook 654), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C.

Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.

Houghton, R.A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11:945-958.

Hughes, L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends Ecol. Evol.* 15(2):56-61.

Hughes, M. K. 2002. Dendrochronology in climatology: the state of the art. *Dendrochronologia* 20:95–116.

Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques In: Simposio Internacional, Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002. Delmo Comunicaciones S. A de C. V. México, D. F. México. 258 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2005. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Informe Especial. Informe del Grupo de trabajo III. Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer (Eds). Cambridge University Press, Press. Cambridge, U K.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento V del IPCC. Gitay, H., A. Suárez, R.T. Watson, D.J. Dokken (Eds.). PNUMA. 85 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de

Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 p.

Isebrands, J.G., E.P. McDonald, E. Kruger, G. Hendrey, K. Percy, K. Pregitzer, J. Sober, D.F. Karnosky. 2001. Growth response of *Populus tremuloides* clones to interacting elevated carbon dioxide and tropospheric ozone. *Environmental Pollution* 115: 359-371.

Jacoby, G. C. and R. D. D'Arrigo. 1997. Tree rings, carbon dioxide, and climatic change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94:8350-8353.

Jaramillo, V.J. 2004. El ciclo global del carbono. *In*: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.). Cambio Climático una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp. 77-85.

Jong B., H.J., O. Masera C. y T. Hernández-Tejeda. 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez, J. y A. Fernández (Eds.) Jiménez Editores e Impresores, S. A. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. México. pp. 369-380.

Kienast, F. y R.J. Luxmoore. 1988. Tree-ring analysis and conifer growth responses to increased atmospheric CO₂ levels. *Oecologia* 76:487–495.

Kimball, B.A., P.J. Pinter, R.L. Garcia, R.L. LaMorte, G.W. Wall, D.J. Hunsaker, G. Wechsung, F. Wechsung, T. Kartschall. 1995. Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Glob Change Biol* 1:429–442.

Koch P. 1989. Estimates by Species Group and Region in the USA of: I Below-Ground Root Weight as a Percentage of Oven dry Complete- Tree

Weight; and II Carbon Content of Tree Portions. Unpublished Consulting Report. 23 p.

Körner, C. 2003. Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology* 91:4-17.

LeMarche, V.C. Jr., D.A. Graybill, H.C. Fritts & M.R. Rose. 1984. *Science* 225:1019–1021.

Linares, J.C., J.J. Camarero. 2010. Evaluando los efectos del cambio global sobre el funcionamiento de los abetos ibéricos mediante análisis de isótopos de carbono en los anillos de crecimiento. *Ecosistemas* 19(3):24-40. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=658>

Locatelli, B. y S. Leonard. 2001. Un método para medir el carbono almacenado en los bosques de malleco (Chile). *Bois Et Forêts Des Tropiques* 267(1):69-81.

Magaña, V. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. *In*: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.). *Cambio Climático una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp.17-28.

Marlan G., T. Boden y B. Andres. 2003. Global, Regional and National CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn. Disponible en: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>

Moore, D.J.P., S. Aref, R.M. Ho, J.S. Phippen, J.G. Hamilton, E.H. DeLucia. 2006. Annual basal area increment and growth duration of *Pinus taeda* in response to eight years of free-air carbon dioxide enrichment. *Glob Change Biol* 12:1367–1377.

Norby, R.J. *et al.* 2005. Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *Proc Natl Acad Sci USA* 102:18052–18056.

Norby, R.J., C.A. Gunderson, S.D. Wullschleger, E.G O'Neill, M.K. McCracken. 1992. Productivity and compensatory responses of yellow poplar trees in elevated CO₂. *Nature* 357:322-324.

Ordóñez, J. A. B, O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12.

Pardos, J.A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. 253 p.

Prentice I.C., G.D. Farquhar M.J.R. Fasham M.L. Goulden M. Heimann V.J., Jaramillo H.S. Kheshgi C., Le Quere R.J. Scholes A., Wallace, D.W.R., 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. En: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edits.: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Cambridge University Press, Cambridge, 183-237.

Reynolds, J.F., P.C. Harley, R.B. Thomas y B.R. Strain. 1992. *Plant, Cell and Environment* **15**, 271–282.

Roper, J. y R. Roberts. 1999. Deforestación: Bosques tropicales en disminución, Red de asesores forestales de la ACIDI (RAFA), México. <http://www.rcfan.org/spanish/s.issues.12.html>

Silva A., F.M. 2006. Estimación de factores de expansión de biomasa y carbono en ecosistemas forestales del Norte de México. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, N.L. 70 p.

- Spiecker, H. 1999. Overview of recent growth trends in European forests. In: Sheppard, L.N. & J.N. Cape (Eds.) 1999. Forest Growth Responses to Pollution Climate of the 21st Century. Kluwer Academic Publishers.
- Stahle, D.W., J. Villanueva, M.K. Cleaveland, M.D. Therrell, G.J. Paull, B.T. Burns, W. Salinas, H. Suzan and P.Z. Fule. 2000. Recent tree-ring research in México. En F.A. Roig (compilador). Dendrocronología en América Latina. EDIUNC. Capítulo de libro. Pp 285-306.
- Stan, D., S.D. Wullschleger, L.H Ziska, J.A. Bunce. 1994. Respiratory responses of higher plants to atmospheric CO₂ enrichment. *Physiologia Plantarum* 90:221-229.
- Swetnam, T.W., M.A. Thompson and A.K. Sutherland. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. Spruce budworms handbook. U.S. Dep. Agr. Agriculture handbook No. 639.
- Tognetti, R., P. Cherubini, J.L. Innes. 2000. Comparative stem-growth rates of Mediterranean trees under background and naturally enhanced ambient CO₂ concentrations. *New Phytologist* 146:59-74.
- Valladares, F. 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 397-423. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.
- Villanueva D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano P., M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, E. Cornejo O. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83:117–131.
- Villanueva D., J., G.R. McPherson. 2002. Impacto del cambio de uso del suelo e incendios en la estructura de tres comunidades forestales. *Ciencia Forestal* 27(91):27-53.

Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, J. Estrada A., V. Constante G. 2008. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 49 p.

Wullschleger, S.D., W.M. Post & A.W. King. 1995. In: Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?, eds. Woodwell, G. M. & Mackenzie, F. T. (Oxford Univ. Press, New York). pp. 85–107.