



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO FORESTAL**

**ÍNDICES DE ANILLOS DE CRECIMIENTO EN CONÍFERAS DEL  
EJE NEOVOLCÁNICO TRANSVERSAL DE MÉXICO**

**GABRIEL MARTÍNEZ MOLINA**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2011**

## RESUMEN

### ÍNDICES DE ANILLOS DE CRECIMIENTO EN CONÍFERAS DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSVERSAL DE MÉXICO

Se determinaron índices de crecimiento a partir de los anillos anuales en *Abies religiosa* (Kunth Schltld. et Cham) (oyamel) y *Pinus hartwegii* (Lindl.) (pino) en un transecto sobre el Eje Neo-volcánico Transversal, en México. El muestreo se repitió en sitios con condiciones ambientales similares en seis montañas del centro de México, donde se desarrollan ambas especies forestales. Las montañas seleccionadas fueron: Nevado de Colima, Pico de Tancítaro, Nevado de Toluca, Cerro Tláloc, La Malinche y Pico de Orizaba. Se colectaron virutas de incremento de al menos 20 árboles longevos de cada especie en cada sitio; sin embargo, para fines de este estudio se seleccionaron los árboles más representativos quedando entre 6 y 17 árboles de cada especie en cada montaña (144 árboles en total). El intervalo de altitud para el muestreo para oyamel fue entre 3,000 y 3,500 msnm y para pino de 3,200 a 3,800 msnm. Los resultados indicaron que los árboles de pino son más longevos que los de oyamel. La tendencia de los índices de anillo de crecimiento es diferente para las especies y las montañas; sin embargo, aproximadamente en el año 1935 se observa una reducción de crecimiento para ambas especies. El Oyamel mostró mayor variación en los índices de crecimiento y una tendencia de mayor crecimiento en los últimos 3 años. En el caso de pino, sólo en las montañas del Nevado de Toluca y Pico de Orizaba se observó una tendencia de mayor crecimiento, pero desde el año 2000 a la fecha. De las dos especies, sólo en Oyamel se observó relación entre los índices de anillo y la precipitación total. La información generada por esta investigación constituye una línea base para estudios posteriores relativos al Cambio Climático Global.

**Palabras clave:** *Crecimiento radial, Bosques de alta elevación, Indicadores de clima.*

## ABSTRACT

### TREE RING INDEXES IN CONIFERS OF THE TRANSVERSAL VOLCANIC AXIS OF MEXICO

Growth indices were determined from annual rings of *Abies Religiosa* (Kunth Schltl. et Cham (fir) and *Pinus hartwegii* ) (Lindl.) (pine) in a transect along the Neo-Volcanic axis in Mexico. Wood core sampling was repeated at sites with similar environmental conditions in six mountains in central Mexico, where both forest species grow. The mountains selected were: Nevado de Colima, Pico de Tancitaro, Nevado de Toluca, Cerro Tlaloc, La Malinche and Pico de Orizaba. Wood cores were collected from at least 20 long-lived trees from each species at each site; however, at the end of this study the most representative trees were selected working with a variable number from 6 to 17 trees of each species in each mountain (144 trees in total). The sampling range in altitude for fir was from 3000 to 3500 masl and for pine from 3200 to 3800 masl. Results indicate that pine trees are older than those of fir. The trend of the indices of annual growth is different for tree species and mountains. However, around the year 1935 a reduction in tree growth was observed for both species. Fir showed higher variation in growth and a trend for better growth in the last three years. In the case of pine, only the mountains of Nevado de Toluca and Pico de Orizaba showed a better tree growth from the year 2000 to date. Of the two species, only in fir showed significant correlation between the ring indices and total precipitation. The information generated by this research constitutes a baseline for future studies related to global climate change.

**Index words:** *Radial growth, high altitude forests, climate change indicators*

## **DEDICATORIA**

A mi madre Ana María Molina García por enseñarme a ser humilde, a tener respeto por los demás y ser valiente en momentos de retos.

A mis hermanos Fredy, Ulises y Yuridía, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis tíos Agustín, Roberto, Arturo y Miguel, por ser mi respaldo en los tiempos más complicados de mi vida y por la unión que los caracteriza.

A mis abuelos Encarnación Villagrán y Lorenzo Molina, por mantener la unión en la familia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mis agradecimientos a todas y cada una de las personas que contribuyeron a la realización de esta tesis.

En primer lugar le agradezco al Dr. Armando Gómez Guerrero, quien además de ser el director de esta tesis, es sin duda una de las personas que ha contribuido a mi formación profesional.

Mis más profundos agradecimientos a cada uno de los miembros del Consejo Particular: Dra. Bárbara Kishchuk (Servicio Forestal de Canadá), Dr. Tomas Martínez Trinidad, Dr. Alejandro Velázquez Martínez, y al Dr. Armando Gómez Guerrero (Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados-Campus Montecillos), quienes me ayudaron con su asesoría consejos y amistad a culminar de la mejor manera este trabajo.

Al Dr. Marcos Jiménez Casas (postgrado forestal), agradezco profundamente la revisión cuidadosa de algunos textos de esta tesis.

Agradezco profundamente el apoyo económico proporcionado por CONACYT, para la elaboración de la investigación, así como, por la beca de maestría recibida.

# CONTENIDO

Pág.

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
CONTENIDO.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
I.INTRODUCCIÓN.....	1
II.OBJETIVOS.....	3
III.HIPOTESIS.....	4
IV.REVISION DE LITERATURA.....	5
4.1 Formación de anillos de crecimiento.....	5
4.2 Estandarización de anillos de crecimiento.....	6
4.3 Estudios regionales basados en anillos de crecimiento.....	8
4.4 Índices de crecimiento y su relación con los datos meteorológicos.....	10
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
5.1 Ubicación del área de estudio.....	12
5.2 Descripción de las montañas estudiadas.....	13
5.2.1 Parque Nevado de Colima.....	13
5.2.2 Pico de Tancítaro.....	14
5.2.3 Volcán Nevado de Toluca.....	18
5.2.4 Cerro Tláloc.....	19
5.2.5 La Malinche.....	21
5.2.6 Pico de Orizaba.....	25
5.3 Muestreo de virutas.....	27
5.4 Análisis de la Información.....	28
5.5 Análisis de la información Climática.....	29
VI. RESULTADOS Y DISCUSION.....	31
6.1 Índices de anillo de crecimiento por especie.....	31
6.2 Índices de anillo de crecimiento por especie y montaña.....	32
6.3 Índices de anillo de crecimiento y variables meteorológicas.....	37
VII. CONCLUSIONES.....	41
VIII. LITERATURA CITADA.....	43
IX. APÉNDICE.....	47

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de la estandarización de anillos de crecimiento. La gráfica de la derecha representa el cociente de los valores reales entre los predichos.....	8
Figura 2. Distribución de los sitios de estudio dentro del Eje Neo volcánico Transversal de México.....	12
Figura 3 (A) Vista panorámica del Nevado de Colima. (B) Vista aérea del Nevado de Colima (adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.....	14
Figura 4. (A) Vista panorámica del Pico de Tancítaro. (B) Vista aérea del Nevado de Colima (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.....	15
Figura 5. (A) Vista panorámica del Nevado de Toluca de archivo personal. (B) Nevado de Toluca (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.....	19
Figura 6. (A) Vista típica de un rodal de <i>P. hartwegii</i> en el Cerro Tláloc. (B) Vista panorámica del Cerro Tláloc (Adaptada de la página de Google Earth).....	20
Figura 7. (A) Vista panorámica de un rodal de <i>P. hartwegii</i> en la Malinche. (B) Vista panorámica del Cerro Tláloc (Adaptada de la página de Google Earth).....	21
Figura 8. (A) Vista panorámica del Parque Nacional Pico de Orizaba. (B) Parque nacional Pico de Orizaba (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.....	25
Figura 9. (A) extracción de virutas con taladro de Pressler en <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. (B) corte longitudinal de virutas.....	28
Figura 10. Índices de anillo e crecimiento para oyamel (rojo) y pino (azul) en árboles colectados en seis montañas del Eje Volcánico Transversal. Las barras superiores corresponden al error estándar de oyamel (rojo) y pino (Azul).....	32
Figura 11. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en el Nevado de Colima.....	33
Figura 12. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en el Pico de Tancítaro.....	33
Figura 13. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en el Nevado de Toluca.....	33

Figura 14. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en el Cerro Tláloc.....	34
Figura 15. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en La Malinche.....	34
Figura 16. Índices de anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> en el Pico de Orizaba.....	34
Figura 17. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en el Nevado de Colima.....	35
Figura 18. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en el Pico de Tancítaro.....	35
Figura 19. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en el Nevado de Toluca.....	36
Figura 20. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en el Cerro Tláloc.....	36
Figura 21. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en La Malinche.....	36
Figura 22. Índices de anillo de crecimiento para <i>Pinus hartwegii</i> en el Pico de Orizaba.....	37
Figura 23. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Nevado de Colima.....	38
Figura 24. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Pico de Tancítaro.....	39
Figura 25. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Nevado de Toluca.....	39
Figura 26. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Cerro Tláloc.....	39
Figura 27. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para la Malinche.....	40
Figura 28. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Pico de Orizaba.....	40
Anexo. Gráficas <i>Abies religiosa</i> (Oyamel) Ancho de anillo-índice de anillo.....	48
Anexo. Gráficas <i>Pinus hartwegii</i> (pino) Ancho de anillo-índice de anillo.....	60

# I. INTRODUCCIÓN

Los árboles presentan dos tipos de crecimiento, primario y secundario. El crecimiento secundario es el que genera el incremento en diámetro de los tallos y de las ramas formando anillos concéntricos anuales en las gimnospermas. Para fines de manejo de los recursos forestales cada fase de desarrollo del árbol es importante. Por ejemplo, los anillos de crecimiento son importantes para medir la dinámica de productividad y conocer cómo afectan los factores abióticos al crecimiento de las masas forestales con fines de investigación forestal (Klepac, 1983).

Los anillos de crecimiento de las coníferas generalmente son anuales y consisten en dos capas de madera generadas por diferente ritmo de crecimiento, las cuales se identifican como madera temprana y madera tardía (Spurr y Barnes, 1982). La madera temprana o de primavera se forma con células grandes y paredes delgadas, mientras que la madera tardía o de invierno se forma posteriormente con paredes más gruesas y de mayor densidad. El ancho de los anillos anuales varía desde una fracción de milímetros hasta más de un centímetro dependiendo de factores genéticos y ambientales (Villanueva et al., 2008). Fisiológicamente, el ancho de anillo está en función del volumen foliar de la copa, de la actividad de los reguladores de crecimiento y de la cantidad de productos de la fotosíntesis (Spurr y Barnes, 1982).

Los estudios basados en anillos de crecimiento (dendrocronológicos) permiten conocer los cambios en la tasa de crecimiento y por ello, estos trabajos son útiles en estudios de cambio climático. El uso de los anillos de crecimiento para el análisis de productividad en forma espacial y temporal de los bosques se ha empleado desde que se conoció la relación del ancho de anillo y las condiciones meteorológicas (Robinson et al., 1990). Sin embargo, es importante señalar que el ancho de anillos está afectado por diversos factores entre los que destacan, edad del árbol, posición del árbol en la estructura vertical del rodal, factores bióticos (ej. plagas) y factores abióticos (ej. incendios). De tal manera que es muy importante considerar procesos de estandarización de los datos de anillos de crecimiento para no trabajar directamente con el ancho de anillo (Cook y Briffa, 1990).

En este estudio se analizan los anillos de crecimiento de los árboles mediante el uso de indicadores estandarizados y sobre un transecto que se distribuye a lo largo del Eje Volcánico Transversal de México (EVTM). Se estimaron índices de anillo de crecimiento (IAC) para *Abies religiosa* (Kunth Schlttdl. et Cham) y *Pinus hartwegii* (Lindl.) en seis montañas del centro de México que son: Nevado de Colima (NC), Pico de Tancítaro (PT), Nevado de Toluca (NT), Cerro Tláloc (CT), La Malinche (MA) y Pico de Orizaba (PO). El índice de anillo de crecimiento se analizó por especie, por montaña y de manera global. Adicionalmente, se realizaron correlaciones entre el índice de anillo de crecimiento con la precipitación total y temperatura media anual.

## II. OBJETIVOS

- Conocer la tendencia de los índices de anillo de crecimiento en *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* en un transecto de seis montañas del Eje Volcánico Transversal de México.
- Comparar el índice de anillo de crecimiento entre especies y entre montañas en un transecto de la región del Pacífico hacia el Golfo de México.
- Examinar si el índice de anillo de crecimiento en las especies y montañas estudiadas se correlaciona con la precipitación total y temperatura media anual.

### III. HIPÓTESIS

- Los índices de anillo de crecimiento de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* a través del tiempo son iguales en el transecto geográfico del Eje Volcánico Transversal de México que va del Pacífico hacia el Golfo de México.
- No hay diferencias entre los índices de crecimiento de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* en el transecto estudiado.
- Los índices de anillo de crecimiento de las especies forestales estudiadas no se correlacionan con la precipitación total y la temperatura media anual en las montañas estudiadas.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Formación de anillos de crecimiento

Las coníferas se desarrollan generalmente en climas templados y fríos, en lugares donde existe una distinción clara de las condiciones ambientales entre la primavera y el invierno. Lo anterior influye en los ritmos de crecimiento celular afectando tanto en el tamaño de las células como en el grosor de sus paredes. Cuando un árbol inicia su crecimiento en diámetro en la primavera, produce células muy grandes que generan madera de color claro conocida como madera temprana, mientras que al acercarse al final del período de crecimiento las células disminuyen en tamaño y el color de la madera es más oscuro porque la pared celular es más gruesa (Harold y Hocker, 1984). Los anillos anuales de los árboles tropicales son difíciles de distinguir en algunos casos ya que en esos ambientes generalmente hay poca variación estacional del clima.

La transición de madera temprana a madera tardía depende del ambiente y las especies. En algunos casos, la variación abrupta en condiciones climáticas dentro del mismo año favorece la formación de más de un anillo, dando lugar a anillos “falsos”. Algunas especies como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Taxodium mucronatum* Ten., presentan un gran contraste entre la madera temprana y madera tardía y por lo tanto con más potencial para estudios cronológicos en México (Constante *et al.*, 2010).

La disminución del diámetro de células que componen los anillos de crecimiento y el engrosamiento de la pared celular está determinada por dos procesos que se presentan juntos. En el primer caso se relacionan con la disponibilidad de auxinas asociadas con el fotoperiodo, temperatura y humedad, en tanto que en el segundo proceso se involucra la disponibilidad de carbohidratos al final de la fase de crecimiento en altura (Bidwell, 1983).

#### **4.2 Estandarización de anillos de crecimiento**

La estandarización es un proceso que con fines del análisis de los datos elimina los efectos bióticos y abióticos sobre el crecimiento. Por ejemplo, por el propio envejecimiento del árbol se producen anillos más angostos al final de la vida del árbol. Otros factores que afectan el crecimiento son la competencia por recursos agua, luz y nutrientes entre árboles vecinos, la variación de clima, y los agentes externos como son, los incendios y las plagas (Cook y Briffa, 1990). Debido a la diversidad de agentes que afectan el ancho de anillo es difícil obtener conclusiones directamente del ancho de anillo.

Representando en una ecuación los factores que determinan en ancho de anillo, se tiene la siguiente expresión (Cook y Briffa, 1990):

$$R_t = A_t + C_t + D_{1t} + D_{2t} + E_t$$

Donde:

$R_t$  es el ancho de anillo observado.

$A_t$  es el efecto biológico (la edad).

$C_t$  es el efecto climático.

$D_{1t}$  es el efecto de perturbaciones debidas a factores endógenos (competencia).

$D_{2t}$  es el efecto de perturbaciones causadas por factores exógenos (incendios)

$E_t$  es el efecto de variabilidad debida a otros factores no explicados (variación natural)

El proceso de estandarización de los anillos de crecimiento consiste en generar un nuevo indicador a partir del cociente entre los valores reales de ancho de anillo y los valores predichos por un modelo de regresión. Se han empleado diferentes modelos de regresión para relacionar el ancho de anillo y la edad del árbol. El modelo exponencial y las ecuaciones polimórficas de grado 2 al 4 son los dos modelos más comunes (Villanueva *et al.*, 2010). En la Figura 1, se muestra un ejemplo de estandarización, donde se empleó el modelo exponencial.

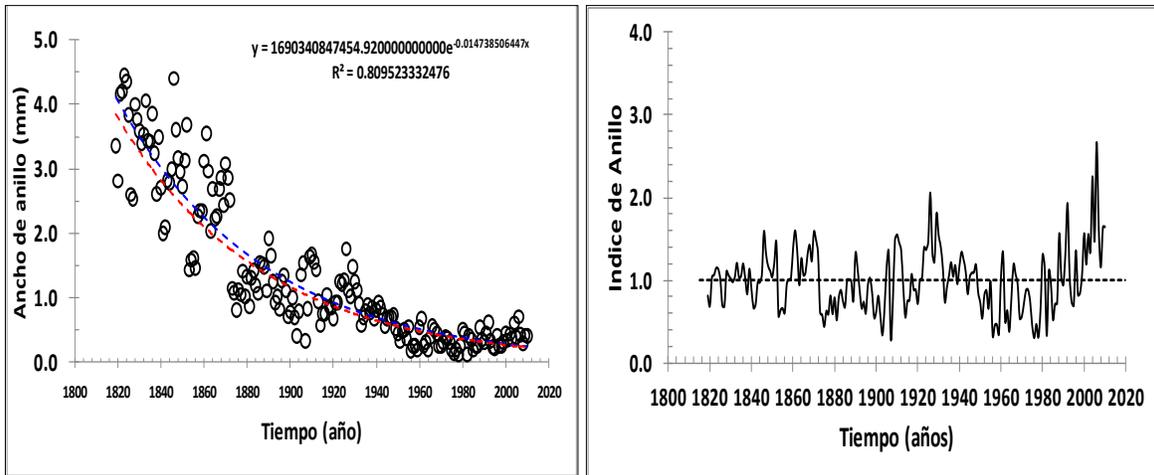


Figura 1. Ejemplo de la estandarización de anillos de crecimiento. La gráfica de la derecha representa el cociente de los valores reales entre los predichos.

### 4.3 Estudios regionales basados en anillos de crecimiento

En México se han desarrollado relativamente pocos trabajos sobre dendrocronología, algunos de ellos están relacionados principalmente con el estudio de los incendios forestales, la contaminación o eventos volcánicos. Por ejemplo, Alarcón (1993) estudió los anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* en el centro de México y su relación con la contaminación ambiental. Los resultados indicaron que los efectos de la contaminación sobre el crecimiento disminuyeron con la distancia a la Ciudad de México. Se observaron dos periodos en la reducción de los anillos, en 1930 y en 1970. El primer periodo estuvo probablemente relacionado a sequía mientras que el segundo, se explica por lo incrementos de ozono y otros contaminantes atmosféricos.

Biondi *et al.* (2003) encontraron una relación fuerte entre el ancho de los anillos de *Pinus hartwegii* y los eventos volcánicos del Volcán de Colima. Los resultados mostraron reducciones del crecimiento entre 30 y 70 % en árboles individuales. Los anillos de crecimiento permitieron reconstrucciones del tiempo hasta el año 1500.

En estudios dendrocronológicos para conocer la dinámica de los incendios forestales naturales de la Sierra de San Pedro Mártir en California, se encontró que la frecuencia de incendios forestales es de 15 años y que coincide con la frecuencia de incendios en los bosques del sur de los Estados Unidos (Stephens *et al.*, 2003). Además se detectó que los incendios anteriores a 1800 se caracterizaron por ser precedidos de un año lluvioso; lo que implica que los años húmedos generan mayor biomasa en los bosques e incrementan la probabilidad de incendios de los años subsecuentes. Por otro lado, Fule *et al.* (2011) estudiaron la frecuencia de incendios forestales en los bosque de la Sierra madre Occidental en el estado de Chihuahua. Con la información de los anillos de crecimiento, se observó que el tiempo de recurrencia de los incendios forestales fue entre 1.9 y 7.6 años. Los efectos de la industrialización se pudieron también reflejar en la dinámica de los anillos de crecimiento.

Fritts *et al.* (1991) construyeron un modelo mecanístico para emplearse con variables climáticas e indicadores de anillos de crecimiento. La ventaja del modelo es que se puede adaptar para diferentes especies y localidades. El modelo se probó con buenos resultados para *Pinus sylvestris* L. en regiones áridas de Siberia

y con *Pinus ponderosa* Laws, en Arizona, Estados Unidos. El uso del modelo permite comprender la relación del clima y el crecimiento de los bosques.

Otros trabajos han encontrado que los anillos de crecimiento también tienen uso a nivel geográfico. Por ejemplo, estudios sobre la composición química de estos en árboles de un parque en California, EE. UU., muestran que el incremento en la concentración de azufre en la atmósfera debido a las erupciones volcánicas se registró en la composición de los anillos. Además se señala que los datos son similares a los estudios reportado para el Volcán Parícutin en el Estado de Michoacán, México (Ort *et al.*, 2009).

Las contribuciones más importantes en México han sido realizadas por Villanueva *et al.* (2010). La relevancia de estas aportaciones radica en la reconstrucción histórica del clima a partir de anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*. Dichas reconstrucciones permiten el análisis de tendencias de eventos extremos de sequía y humedad.

#### **4.4 Índices de crecimiento y su relación con los datos meteorológicos**

Los anillos de crecimiento de los árboles suministran información valiosa temporal acerca del ambiente en el que crecieron. Cada anillo registra la respuesta del árbol a las condiciones ambientales de ese año. Las variables más correlacionadas son la precipitación y temperatura. Puesto que los anillos de los árboles se asocian a un año determinado, en muchas partes del mundo es posible

atribuir fechas precisas de cualquier cambio que muestren los anillos de crecimiento causado por las variaciones del clima (McMahon *et al.*, 2010).

Díaz *et al.* (2001) desarrollaron una cronología del ancho de anillos de *Pinus lagunae* M.F. Passini, en la región Noroeste México, en los Estado de Baja California, Sonora y Sinaloa de 1862 a 1996. El ancho de anillo se relacionó significativamente con la lluvia de invierno; sin embargo, los datos no mostraron buena correlación con los datos de las estaciones meteorológicas del norte de Baja California, debido a que en estos lugares no se tiene un clima mediterráneo.

Por otro lado, Génova (2007) realizó una cronología de *Abies pinzapo* Glauca, en el Parque natural de la Sierra de las Nieves en España. La cronología abarcó 1690 a 1998. En particular se detectó una extrema sequía sucedida de 1990 a 1995. Con la información obtenida se hacen precisiones del clima para efectos de adaptación al cambio climático.

Arreóla y Návar (2010) asociaron cambios del crecimiento en anillos de *Pseudotsuga menziesii* con periodos de sequía en el estado de Nuevo León. Los datos muestras cuatro periodos 1855-1903, 1907-1937, 1950-1963, 1998-2003. En los años de buena disponibilidad de agua los anillos crecieron 1.18 mm por año mientras que en periodos secos el crecimiento fue de 0.82 mm por año.

Trouet *et al.* (2010) estudiaron la cronología de anillos de crecimiento de *Brachystegia spiciformis*, al sur de África. La variación del crecimiento de anillos en cada árbol fue distinta. Los ejemplares variaron de 43 a 149 años. La relación con la precipitación anual fue pobre explicando sólo el 28% de la variación en

crecimiento de los anillos. Los autores proponen intensificar el muestreo para mejorar los resultados.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localizó en el Eje Neo volcánico Transversal de México (ENTM), donde existe poblaciones de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, a los largo del Nevado de Colima, Cerro de Tancítaro, Nevado de Toluca, Cerro Tláloc, La Malinche y Pico de Orizaba (Figura 2). Desde el punto de vista metodológico el ENTM ofrece la repetición de sitios con vegetación similar, variando sólo la ubicación espacial con respecto al océano Pacífico y el Golfo de México.

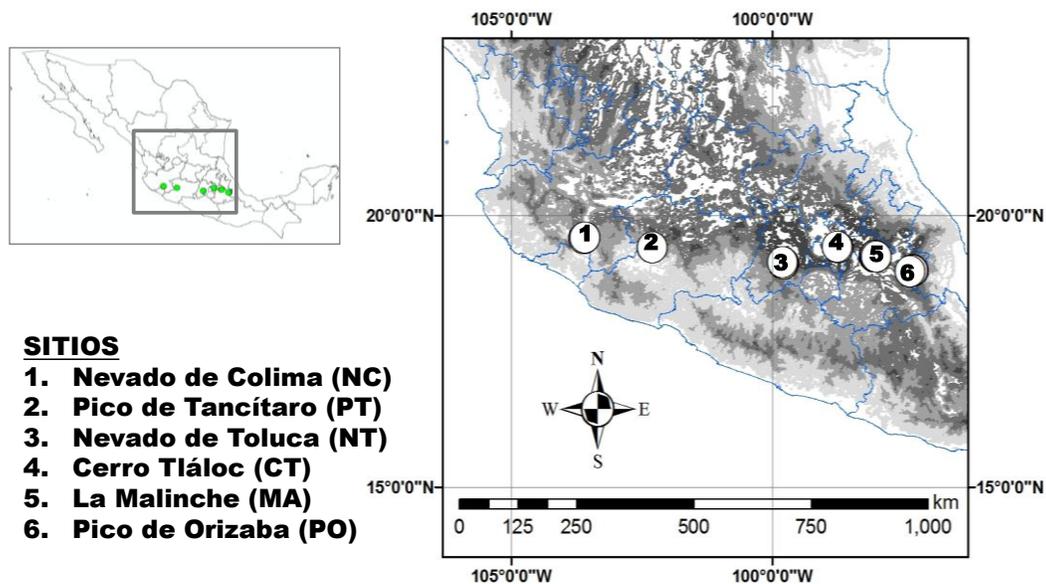


Figura 2. Distribución de los sitios de estudio dentro del Eje Neo volcánico Transversal de México.

El Eje Neo volcánico Transversal se localiza entre los 17° 30' y los 20° 25' de latitud Norte y los 96° 20' y 105° 20' de longitud Oeste, con una longitud aproximada de 930 km de este a oeste y 120 km de norte a sur. En el eje se sitúan las elevaciones más altas de México, como son el Pico de Orizaba (5,650 m), el Popocatepetl (5,450 m), el Iztaccíhuatl (5,280 m), el Nevado de Toluca (4,560 m), la Malinche (4,460 m), el Nevado de Colima (4,340 m), el Tancítaro (4,160 m), el Tláloc (4,150 m) y el Cofre de Perote (4,090 m) (Rzedowski, 1981).

## **5.2 Descripción de las montañas estudiadas**

### *5.2.1 Parque Nevado de Colima*

Se encuentra en el Estado de Jalisco y abarca una superficie de 9,375 hectáreas (Figura 3). Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas 19° 28' 07" y 19° 36' 20" de latitud norte y entre los 103° 33' 20" y 103° 40' 40" de longitud oeste (Vargas, 1984).

La montaña presenta un rango altitudinal de 2,200 a 4,330 metros sobre el nivel del mar (Vargas, 1984). De acuerdo a la Clasificación de la FAO- UNESCO (1988), los suelos son Andosol húmico y vítrico; Cambisol eútrico y Regosol eútrico. Presenta tres tipos de climas: frío tropical y templado, temperaturas medias en los meses de enero- febrero de 5 a 7 °C, abril y mayo de 16 a 34 °C y en invierno de -2 a 5 °C

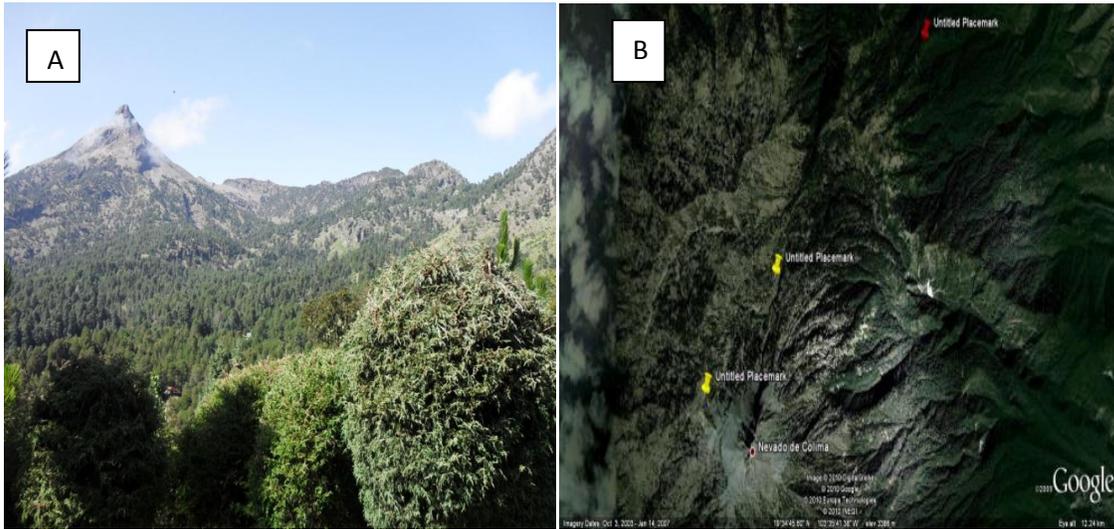


Figura 3. (A) Vista panorámica del Nevado de Colima. (B) Vista aérea del Nevado de Colima (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.

Los bosques de pino se representan por pino escobetón (*Pinus hartwegii*), pino negro (*Pinus rudis* Endl), *Juniperus monticola* Mart. y otros pinos como *Pinus pseudostrobus* Lindl, *P. montezumae* Lamb, *P. tenuifolia* Salisb y *P. douglasiana* Martínez). También existen bosques mezclados de pino, oyamel (*Abies religiosa*), encino (*Quercus* sp.) y aile (*Alnus firmifolia* Fernald).

### 5.2.2 Pico de Tancítaro

El Parque Nacional Pico Tancítaro se ubica entre los 19°20'17" y 19°30'05' de latitud norte y los 102°13'15"; 102°24'10" de longitud oeste (Figura 4). Abarca

parte de los municipios de Tancítaro, San Juan Nuevo Parangaricutiro y Peribán. Comprende una extensión de 19,000 ha con un rango altitudinal de 2,000 a 3,860 msnm.

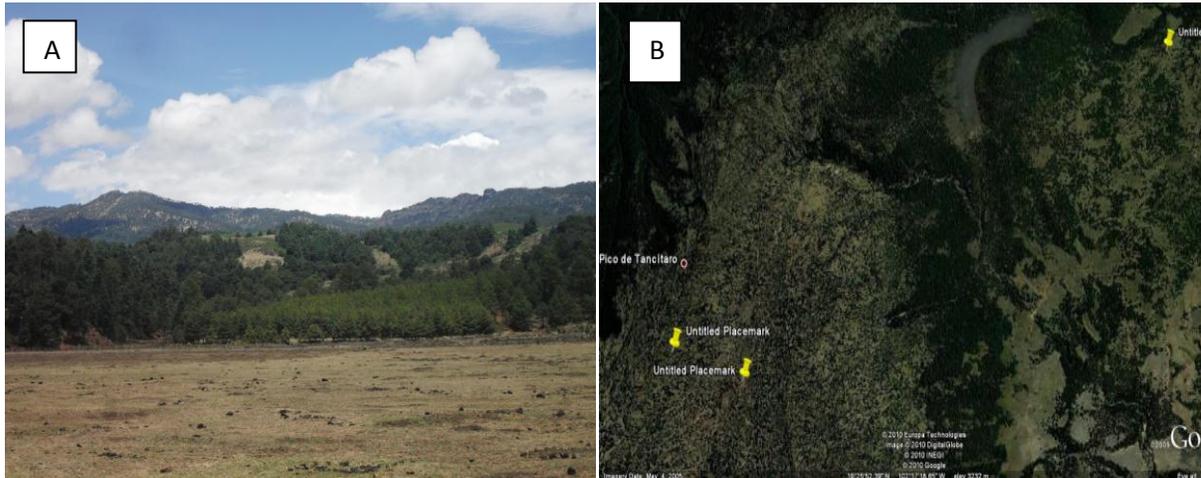


Figura 4. (A) Vista panorámica del Pico de Tancítaro. (B) Vista aérea del Pico de Tancítaro (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.

Según Mooser (1972), en general el Eje Volcánico tiene un arreglo zigzagueante provocado por la presencia de un sistema fundamental de fragmentación ortogonal con dirección noroeste y noreste, en las fracturas. Los grandes estratovolcanes como el Tancítaro, Nevado de Toluca, Popocatepetl y Nevado de Colima están situados en los vértices meridionales de este sistema.

Específicamente la región de estudio, Pico de Tancítaro, es una de las montañas cuyo borde norte forma una de las grandes mesetas de México. En su extensa base existe la acumulación de fragmentos de lava lanzados durante su

etapa de erupción, sobresaliendo formas agudas e irregulares caprichosas de rocas rodeadas de vegetación (Vargas, 1984).

De acuerdo a la clasificación FAO/UNESCO (1988), el 70% de los suelos del Parque se describen como Andosoles. Son suelos de áreas con actividad volcánica reciente, puesto que se originan a partir de cenizas volcánicas. En condiciones naturales tienen vegetación de bosque de pino, oyamel y encino. Tienen una capa superficial de color negro y textura media. Son muy susceptibles a la erosión y las unidades más comunes son Andosol húmico y ócrico, y Regosol eútrico. En las laderas se encuentran Litosoles y caracterizados por afloramientos de roca o Tepetate. En menor proporción se encuentran Cambisoles.

El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques su utilización es forestal; cuando presentan pastizales se puede llevar a cabo algún pastoreo más o menos limitado, y en algunos casos se usan con rendimientos variables para la agricultura, sobre todo en frutales.

Se presentan tres tipos y subtipos climáticos. En la mayor parte de la región hasta los 2500 msnm hay un clima templado subhúmedo con lluvias de verano, C(w2) (w), la precipitación es de 1,200 mm, siendo la del mes más seco menor a 40 mm y el porcentaje de precipitación invernal menor de cinco, mientras que la temperatura media anual oscila entre los 14 y 18 °C.

Por arriba de los 3,000 msnm se presenta un clima semifrío húmedo con abundantes lluvias de verano, C(E)(m)(w), en donde la precipitación anual es de 1,500 mm, correspondiendo a la del mes más seco menos de 40 mm, mientras que el porcentaje de precipitación invernal es mayor a cinco. La temperatura media anual oscila entre 5 y 12 °C y la del mes más frío entre -3 y 18 °C.

Entre 2,500 y 3,000 msnm se localiza un tipo semifrío húmedo con abundantes lluvias de verano, C(m)(w), y el porcentaje de precipitación invernal es menor de cinco.

La vegetación típica es bosque de coníferas, puros y mezclados. Los principales géneros son *Pinus*, *Abies*, *Juniperus* y *Quercus*. En el área de estudio, las coberturas bajas en pino y encino representan bosques abiertos. Es común observar grandes áreas que ocupaban estos bosques los que han cambiado a uso agrícola y frutícola. Las especies típicas son: *Pinus pseudostrobus* Lindl, *P. montezumae* Lamb., *P. devoniana* Lindl, *P. teocote* Schl. et Cham. Con menor frecuencia *P. douglasiana* Mart. y *P. Maximino* H. E. Moore. Dentro del Parque es común observar varias especies desde la cota de los 2,100 m hasta la parte alta de 3,860 m, en que abunda *P. hartwegii*, desde los 3,450 msnm, siendo la única especie arbórea.

Existe también el bosque de *Abies* que se presenta en lugares húmedos de cañadas y áreas abiertas entre 2,450 y 3,200 m de altitud, donde comparte su hábitat los géneros *Pinus* y *Quercus*. La zona de pastizal ó "zacatal" de altura es

también típica. Rzedowski (1978) menciona que en México este tipo de zacatal representa sin duda una vegetación clímax que se desarrolla por encima del límite de la vegetación arbórea, sobre las montañas que alcanzan elevación suficiente para ofrecer este tipo de hábitat. Solo las montañas altas del Eje Neo volcánico incluyendo al Tancítaro tienen manchones de este tipo de vegetación. En esta asociación vegetal los pastos y herbáceas frecuentes son: *Muhlenbergia macroura* (H. B. K.) Hitchc., *Calamagrostis spp.*, *Festuca amplissima* Rupr. y otras plantas como *Arenaria oesbia* Greenm, *Carex cochraney* Reznicek, *Cerastium molle* Ball, *Cirsium nivale* (H.B.K.) Sch. Bip, *Eryngium aternatum* Coult. & Rose, *Gnaphalium americanum* Mill, *Juniperus monticola*, Mart., *Luzula gigantea* Desv, *Plantago australes* Lam, *Ranunculus donianus* Printzel, *Senecio angulifolius* DC. y *Trisetum virletii* E. Fourn. Este tipo de vegetación se desarrolla entre los 3,000 y los 3,800 msnm, en lugares abiertos del bosque de encino y de coníferas.

### 5.2.3 Volcán Nevado de Toluca

Sus coordenadas son entre 99° 38' 54" y 100° 09' 30" de longitud oeste y entre 18° 51' 31" y 19° 19' 03" de latitud norte. Es un volcán con elevación altitudinal de 4,690 m y es el cuarto pico más alto de México. Se ubica a 80 kilómetros al oeste de la Ciudad de México (Figura 5). La temperatura media anual es entre 2 y 12 °C. En las faldas del volcán el clima es templado y lluvioso, cuando en la cumbre el clima es frío.

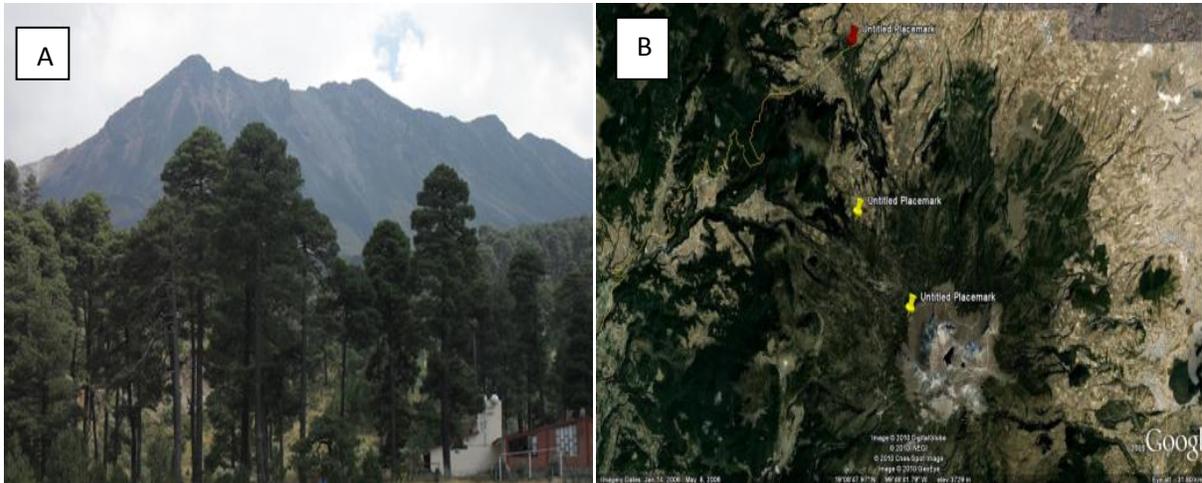


Figura 5. (A) Vista panorámica del Nevado de Toluca de archivo personal. (B) Nevado de Toluca (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.

Es una región prioritaria para la conservación debido a su diversidad biológica derivada del gradiente altitudinal, en la que predominan el bosque de pino, el de oyamel y la pradera de alta de montaña o zacatal. Los tipos de suelo de acuerdo a la Clasificación FAO-UNESCO (1988) son Andosol úmbrico y Feozem háplico.

#### 5.2.4 Cerro Tláloc

Se denomina Sierra Nevada o Sierra de Río Frío a la cordillera que va del Popocatepetl en el sur, a los lomeríos que descienden del Monte Tláloc con una extensión de 70 Km de longitud. Esta sierra está conformada por los montes Tláloc (4,125), Telapón (4,065), Yoloxóchitl (3,900), los Potreros (3,600), el Papayo (3,640), el Tlamacas (3,220), el Tejolota (3,020), la Mesa (2,800) y el

Tezoyo (2,660). (Sánchez-González, 2004). Se localiza a una latitud norte de 19° 24' 41.7" y una longitud oeste de 98° 42' 45 con una altitud de 4,125m (Figura 6).

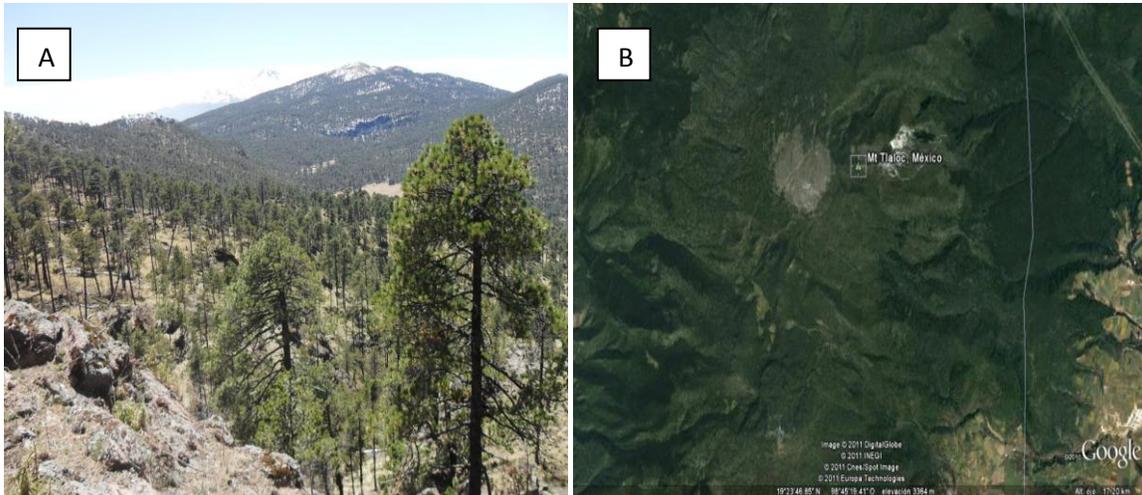


Figura 6. (A) Vista típica de un rodal de *P. hartwegii* en el Cerro Tláloc. (B) Vista panorámica del Cerro Tláloc (Adaptada de la página de Google Earth).

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (1981), el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano Cw (w)b(i'). La precipitación media anual es de 900 mm con mayor precipitación en junio, julio y agosto donde esporádicamente en julio alcanza 1,100 mm; en febrero y en diciembre caen lluvias ocasionales.

La temperatura media anual es de 17 °C; la extrema más caliente de 37 °C es en mayo y la más fría de -2 °C en enero; pueden suceder heladas eventuales entre octubre y abril. La evaporación potencial notablemente más alta que la precipitación oscila entre 900 y 2,300 mm anuales.

Se presentan seis tipos de vegetación natural dominante: encinar arbustivo, bosque de encino, bosque mixto, bosque oyamel, bosque de pino y zacatonal alpino. Los suelos son negros y profundos ricos en materia orgánica de un textura media con un pH entre 5.5 y 7.1.

### 5.2.5 La Malinche

El volcán se encuentra entre las coordenadas  $19^{\circ} 06' 30''$  y  $19^{\circ} 20'$  de latitud norte y entre  $97^{\circ} 55' 30''$  y  $98^{\circ} 10' 30''$  de longitud oeste (Figura 7). Los municipios de influencia son en Tlaxcala: San Juan Ixtenco, Chiautempan, Huamantla, Teolochoico, Xitlatepec, Tzompantepec, Mezatecochco, Acuamánalá, Contla, San Pablo del Monte y en Puebla: Amozoc, Puebla, Acajete, Tepatlaxco de Hidalgo. El área de influencia se extiende sobre 45,711 hectáreas.

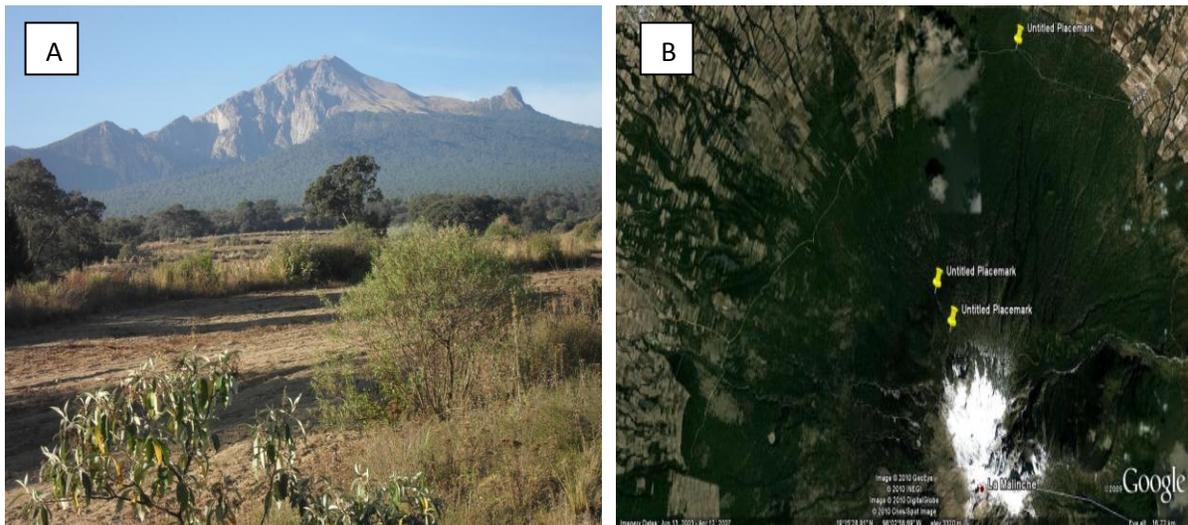


Figura 7. (A) Vista panorámica de *P. hartwegii* en la Malinche. (B) Vista panorámica del Cerro Tlálóc (Adaptada de la página de Google Earth).

El uso del suelo del parque nacional es: 30% agrícola, 21% pecuario, 42% forestal y 7% con otros usos. Presenta el 77 % de su vegetación deteriorada, 19 % de bosques y 4 % de áreas perturbadas. El sobrepastoreo, la tala ilegal y los incendios forestales tienen una alta incidencia en el sitio, mientras que la cacería es de mediana intensidad.

El volcán La Malinche es la quinta cima de México. El parque incluye un rango en altitud de 2,400 a 4,461 msnm. En el Parque se encuentran presentes varios tipos de suelos; en la parte superior entre 4,500 y 4,300 metros sobre el nivel del mar se encuentra una zona de Litosoles eútricos y dístricos, consistentes en rocas volcánicas coherentes, muy pedregosa y con tobas volcánicas. De los 4,300 a los 3,900 metros se encuentran los Regosoles dístricos consistentes en corrientes de ceniza, arena limosa y material gravoso y pedregoso, generalmente se encuentra cubierto por pastizal; estos suelos se pueden encontrar con Litosoles y Andosoles. De los 3,900 a los 3,200 msnm se encuentra la zona boscosa sobre Andosoles húmicos y vítricos consistentes en cenizas andesíticas, ricas en alofanos, con contenidos altos a regulares de materia orgánica. A estos, sigue una zona de Andosoles vítricos y ócricos en donde comienzan los terrenos de cultivo aproximadamente a 2,800 msnm, en los que aparecen Regosoles eútricos y Fulvisoles arenosos, migajón limoso o migajones areno limosos (Rzedowski, 1981).

La zona de la Malinche forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Río Atoyac-Zahuapan. El volcán es sumamente importante en el abastecimiento de

agua para la región, ya que aporta volúmenes considerables a las corrientes subterráneas que favorece a la subsistencia de la actividad agropecuaria.

Este parque protege afluentes que alimentan al río Zahuapan y Atoyolca en la zona de Tlaxcala y por el lado de Puebla protege la Presa de Valsequillo. El volcán presenta una sola corriente permanente denominada Río Barranca de la Malinche, la cual se origina en el lado este y atraviesa al municipio de Trinidad Sánchez. Las demás corrientes son temporales: el río Apizaco al noroeste; el río San Juan al Oeste; el río Barranca Seca, el río Barranca de la Soledad y el río Barranca Hejotitla al suroeste (Rzedowski, 1981).

Los tres tipos de climas que presenta el sitio son: frío con lluvias en verano con temperatura media anual de 2 a 5 °C, donde el mes más frío registra temperaturas bajo cero. Semifrío subhúmedo con temperatura media anual de 5 a 12° C y con el mes más frío con temperaturas entre -3 a 18 °C. Templado subhúmedo con temperaturas entre 4 a 14 °C y con una precipitación de 1000 mm.

Dentro del parque nacional se encuentran varios tipos de vegetación:

Zacatonal. Comprende áreas ubicadas arriba de los 4,000 y hasta los 4,500 msnm. Sus componentes herbáceos característicos son *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud, y *Festuca tolucensis* Kunth, hasta los 4,300

msnm; a una altitud mayor son sustituidas por *Festuca livida* Willd, y *Arenaria bryoides* Willd. ex Schtdl., que llegan hasta los 4,500 msnm.

Bosque de alta montaña. Se encuentra aproximadamente entre los 3,200 y 4,000 msnm. Este tipo de vegetación está constituido principalmente por *Pinus hartwegii* en las partes altas. En las partes bajas se mezcla especialmente en las barrancas con oyamel (*Abies religiosa*), en otras áreas bajas con cedro (*Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl). La vegetación herbácea de este bosque la constituye el zacate *Festuca tolucensis* Kunth. El bosque de oyamel se encuentra en altitudes que van de 2,800 a 3,200 msnm, aunque llega alcanzar la cota de 3,500; dependiendo de altitudes y exposiciones, dentro de este bosque se pueden encontrar: *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *Cupressus lindleyi* y *Alnus* sp.

Bosque de pino-encino. Se distribuye a una altitud que varía entre 2,600 y 2,850 msnm. En las partes bajas suele dominar el encino y en las altas los pinos, en la parte media se encuentran mezclas en proporciones variables de ambas especies. Las especies representativas son *Pinus leiophylla* Schl. et Cham, *P. montezumae* Lamb, *P. pseudostrobus* Lindl, *P. patula* Schl. et Cham y *P ayacahuite* Veitchii Shaw, la latifoliada más frecuentes es el encino (*Quercus* sp.) de tipo perennifolio o caducifolio.

Área de táscate. Se extiende en las partes medianas y bajas del parque, ocupando áreas de gran amplitud, las especies representativas son: y *Juniperus deppeana* y *Juniperus deppeana* var. *robusta* Steud.

### 5.2.6 Pico de Orizaba

Se localiza entre los  $18^{\circ} 56' 30''$  y  $19^{\circ} 09' 30''$  de latitud norte y los  $97^{\circ} 12' 30''$  y  $97^{\circ} 22' 30''$  de longitud oeste. El área de influencia abarca 19,7550 ha (Figura 8).

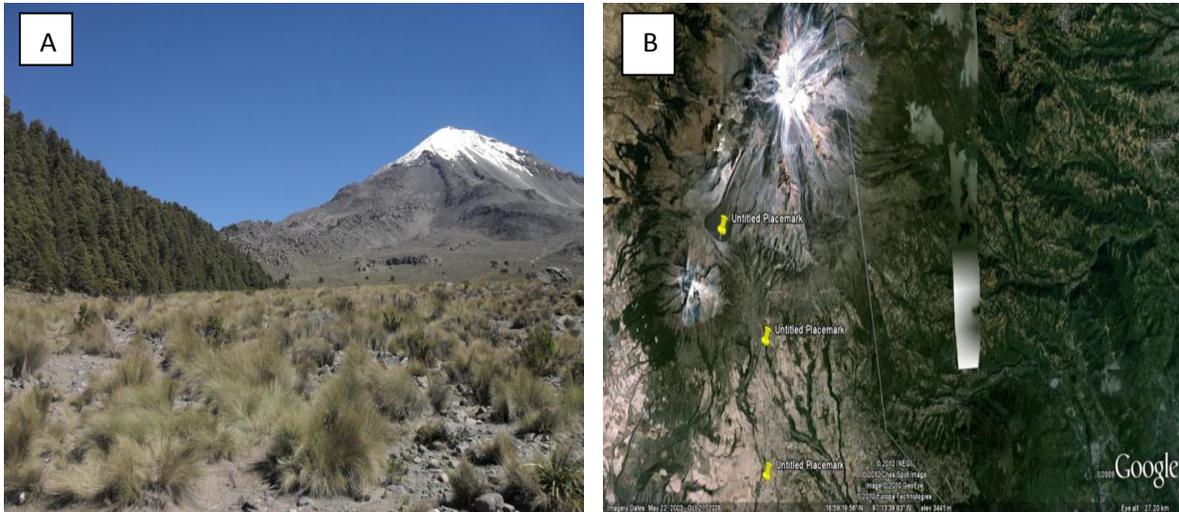


Figura 8. (A) Vista panorámica del Parque Nacional Pico de Orizaba. (B) Parque nacional Pico de Orizaba (Adaptada de la página de Google Earth). Las marcas sobre la imagen corresponden a algunos sitios de muestreo.

Se distribuye en rango altitudinal que va de los 2,700 a los 5,760 msnm. Su estructura dominante tiene una dirección norte-sur y se conoce como Sierra del Citlaltépetl. Es un gran estrato volcánico que ostenta una forma cónica casi perfecta, aunque presenta en su lado este, pendientes muy escarpadas. Hacia el sur le acompaña un macizo antiguo, apagado, bastante erosionado y sin vestigios de cráter, llamado Atzintli o Sierra Negra, con una altitud aproximada a los 5,000 m (SARH, 1993).

Los suelos representativos son el Andosol derivado de cenizas volcánicas. El suelo presenta un alto contenido de materia orgánica con estructura en grano fino con capacidad de retener gran cantidad de humedad y de poseer un excelente drenaje interno (SARH, 1993). También hay suelos tipo Regosol poco desarrollado que proviene de material no consolidado de perfiles truncados por el alto grado y persistencia de la erosión.

Presenta tres tipos de climas: El clima templado húmedo con lluvias todo el año predominantemente en la vertiente oriental, entre los 2,200 y los 3,200 msnm. La estación más seca es la primavera donde se registran las temperaturas más altas de todo el año, generalmente en el mes de abril.

El templado subhúmedo predomina en la vertiente occidental arriba de los 2,600 msnm. Es muy parecido al anterior, pero difieren en el régimen pluviométrico: el verano es lluvioso, mientras que el invierno es seco.

El clima frío predomina entre los 3,200 y los 4,300 m de altitud. La temperatura media anual oscila entre los 2 y los 5 °C. Gran parte de la precipitación es en forma de nieve. En la vegetación subalpina, el representante del estrato arbóreo es *Pinus hartwegii*; su rango altitudinal va de los 3,000 a los 4,000 msnm. Otra especie común es *Abies religiosa* que se localiza en las laderas y fondos de las Barrancas.

### 5.3 Muestreo de virutas

En cada una de las seis montañas se hizo un recorrido para conocer las condiciones del lugar y localizar los árboles representativos de ejemplares de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*. Se eligieron árboles sanos y en lo posible longevos considerando su forma de copa, separación de entrenudos, altura, diámetro y color de corteza para obtener 20 individuos. Las virutas para el análisis de anillos de crecimiento se obtuvieron con un taladro de Pressler marca HAGLOF, modelo BS009 de 12 mm de diámetro interno. La viruta se tomó a 1.30 m (DAP) sobre el nivel del suelo y en cada sitio de colecta se geo-referenció para un remuestreo.

Una vez colectadas las virutas de cada una de las especies se etiquetaron con el nombre del sitio, nombre de la especie, altitud, latitud norte, latitud oeste, diámetro y fecha de colecta. Posteriormente se envolvieron en papel aluminio para su protección y traslado. En el laboratorio, las virutas se secaron a temperatura de ambiente por 5 días. Con las virutas secas se procedió a realizar un corte longitudinal con una sierra contorneadora marca RYOBI de sierra fina 5 " para obtener dos muestras con cara limpia y plana de los anillos (Figura 9).

Los cortes longitudinales de las virutas se pulieron con papel lija para obtener un mejor contraste de los anillos. La mitad de la viruta se dejó para el análisis de isótopos en madera, que fue otro estudio paralelo al presente y la otra

mitad se empleó para realizar la medición de ancho de anillos mediante el uso de paquete de cómputo llamado WINDENDRO.

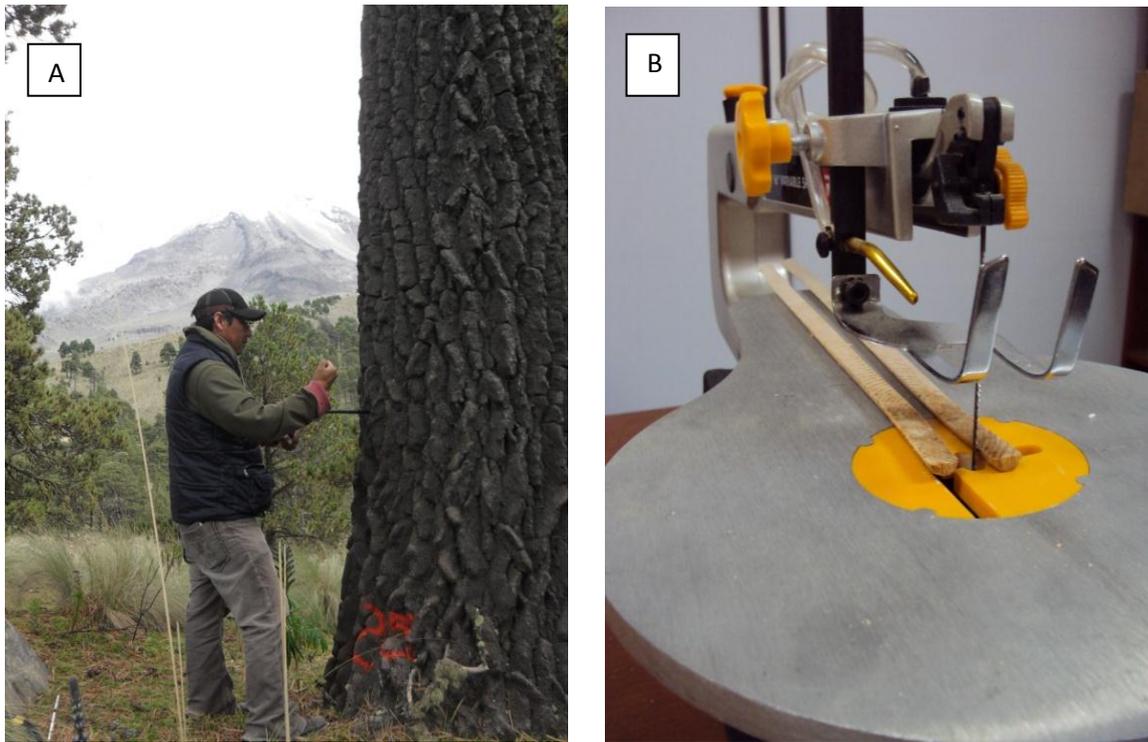


Figura 9. (A) extracción de virutas con taladro de Pressler en *Pinus hartwegii* Lindl. (B) corte longitudinal de virutas.

#### 5.4 Análisis de la información

Para estandarizar los datos del ancho de anillos de crecimiento se procedió de acuerdo a la metodología de Cook y Briffa (1990) y Villanueva *et al.* (2010). Para cada árbol se ajustó un modelo polinomial de orden 1 a 5 según se requería para describir el ancho de anillo como función del tiempo. En algunos casos, se empleó el modelo exponencial. Una vez ajustado el modelo de regresión se estimó un valor predicho de anillo de crecimiento con base en el modelo de regresión. El

índice de anillo de crecimiento (IAC) se estimó como el cociente del valor real del anillo y el estimado por la ecuación de regresión.

Para posicionar los valores de IAC en una media común se verificó que la distribución de los IAC fuera con media uno. En los casos que la media no fuera uno, se empleó la herramienta de Excel llamada "Solver" para estimar los parámetros de la regresión de tal forma que la media de los IAC se ajustara a uno. Las restricciones fueron minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre el valor real y el predicho, pero asegurando una media uno de los valores de IAC. Con este proceso de estandarización la comparación entre árboles de diferente edad y localidad fue válida. La estimación de las regresiones y cálculos de IAC para cada árbol se incluyen en el Anexo.

Los valores de IAC se graficaron en función del tiempo, por especie y por montaña para conocer sus tendencias. Por otra parte, se buscó un estación meteorológica cercana y con un registro histórico lo más antiguo posible para correlacionar los datos de IAC con la precipitación total y temperatura media anual. En este último proceso se empleó el modulo CORR del paquete estadístico SAS.

## **5.5 Análisis de la información climática**

Para relacionar los índices de crecimiento de cada montaña con la precipitación y temperatura media anual, se buscaron estaciones lo más cercano posibles a las montañas. Sin embargo, no siempre fue posible encontrar disponibilidad de datos en las estaciones más cercanas, ya que en algunas de

ellas se tienen datos incompletos y dejaron de funcionar desde los años 80 y 90. Por lo anterior, dentro de lo posible se buscaron estaciones cercanas con datos.

Se buscó rescatar el periodo de tiempo lo más amplio posible pero con datos completos. Desafortunadamente, en algunos casos sólo hay periodos confiables de diez años. Con las limitaciones anteriores se extrajo la información de la base de datos del IMTA conocida como Eric III versión 2. Las estaciones elegidas para NC, PT, NT, CT, MA y PO fueron respectivamente: Quito, Jalisco; Peribán, Michoacán; Nevado de Toluca, Estado de México; Río Frío, Estado de México; Achichapa, Tlaxcala y Tetelzingo, Veracruz.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Índices de anillo de crecimiento por especie

Los resultados mostraron que *Pinus hartwegii* es una especie más longeva debido a que se encontraron registros desde el año 1,750 a la fecha, mientras que *Abies religiosa* presentó individuos 100 años más jóvenes con registros desde el año 1850. La Figura 10 muestra la variación de IAC para las dos especies estudiadas. El manejo de cada especie influye en la edad de los individuos que se pueden encontrar, pero en este caso dado que el muestreo se orientó a árboles longevos, se considera que los resultados son un reflejo de la longevidad de las dos especies. Un aspecto importante es que la variación de IAC es más amplia en oyamel comparada con pino. De tal forma que los resultados indican que oyamel es más sensible a cambios ambientales aunque su longevidad menor limita la amplitud de registros históricos de IAC.

Llama la atención que oyamel presenta una tendencia de mejor crecimiento en los últimos años, además de un cambio en la variación de los datos. Este resultado podría estar indicando que en los últimos años oyamel está creciendo más de lo esperado, pero se requerirán más estudios al respecto para validar estadísticamente esta tendencia. En oyamel también se destaca una disminución de crecimiento en 1935, la cual también fue detectada por Alarcón (1993).

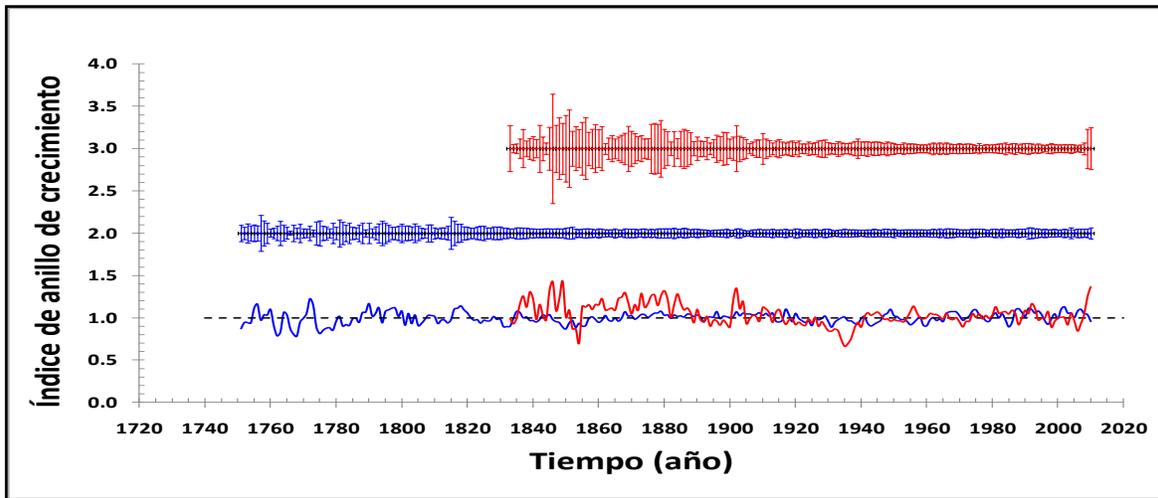


Figura 10. Índices de anillo e crecimiento para oyamel (rojo) y pino (azul) en árboles colectados en seis montañas del Eje Volcánico Transversal. Las barras superiores corresponden al error estándar de oyamel (rojo) y pino (Azul).

## 6.2 Índices de anillo de crecimiento por especie y montaña

Las Figuras 11 a la 16 muestran los IAC para oyamel en cada montaña. Para fines de comparación se presentan los datos en la misma escala de tiempo. Los datos muestran en general que hubo una fase de bajo crecimiento cercano al año 1925 y que después de 1975 hubo una fase de buen crecimiento en las montañas Nevado de Colima, Pico de Tancítaro y Nevado de Toluca. No se observó esta tendencia en Cerro Tlalóc y Pico de Orizaba; lo cual por la ubicación geográfica pudo estar influenciado por algún factor climático tendiente del Golfo o del Pacífico. Además, se observa una fase de buen crecimiento en las montañas de Nevado de Colima, Cerro Tlalóc y Pico de Orizaba influenciado probablemente por factores locales. Los ejemplares más viejos se muestrearon en Nevado de Colima y Pico de Orizaba, es decir en los extremos del transecto.

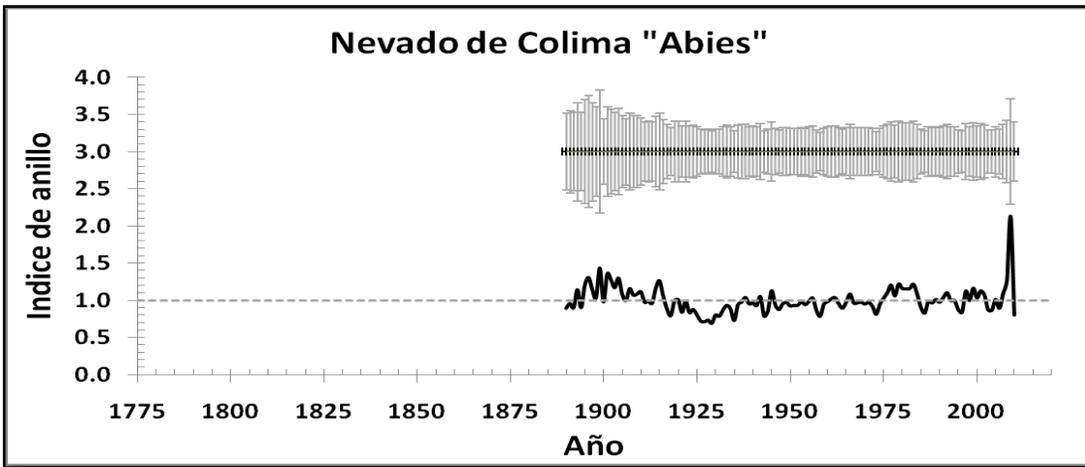


Figura 11. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en el Nevado de Colima.

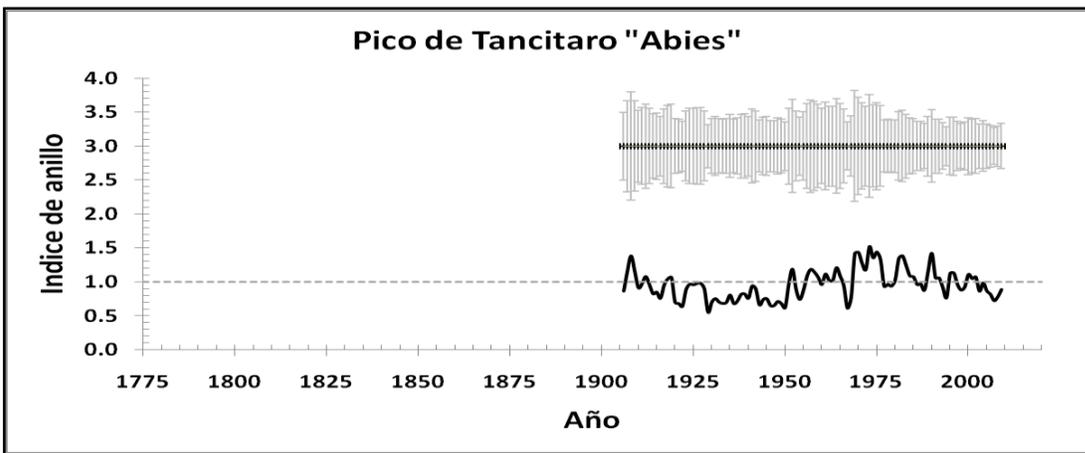


Figura 12. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en el Pico de Tancitaro.

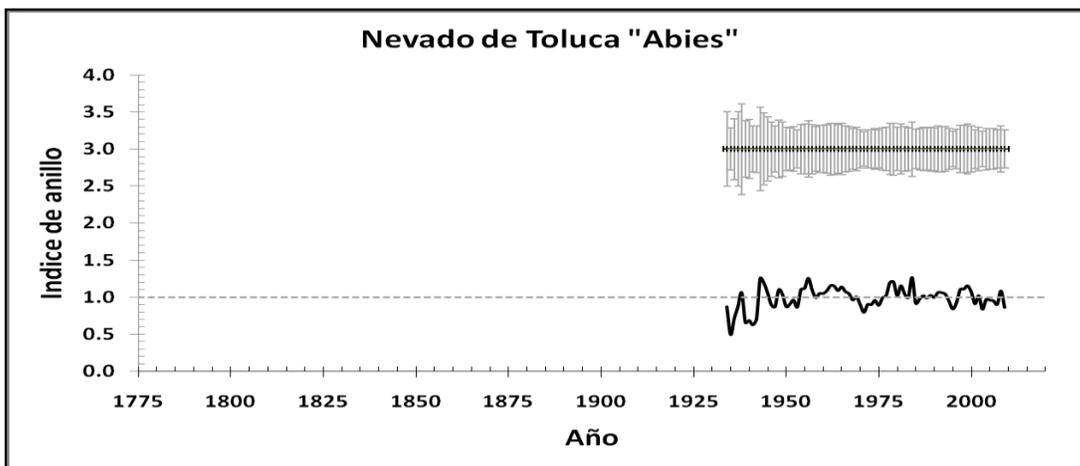


Figura 13. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en el Nevado de Toluca.

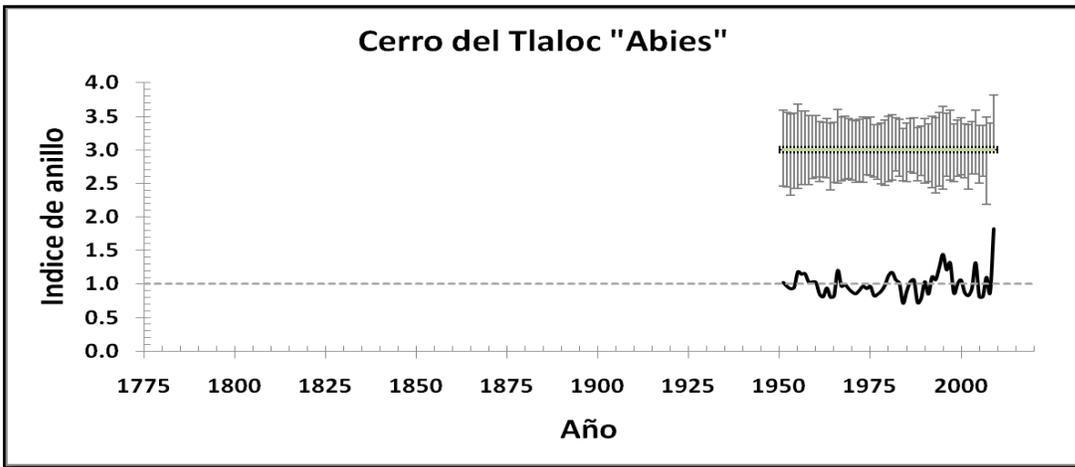


Figura 14. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en el Cerro Tláloc.

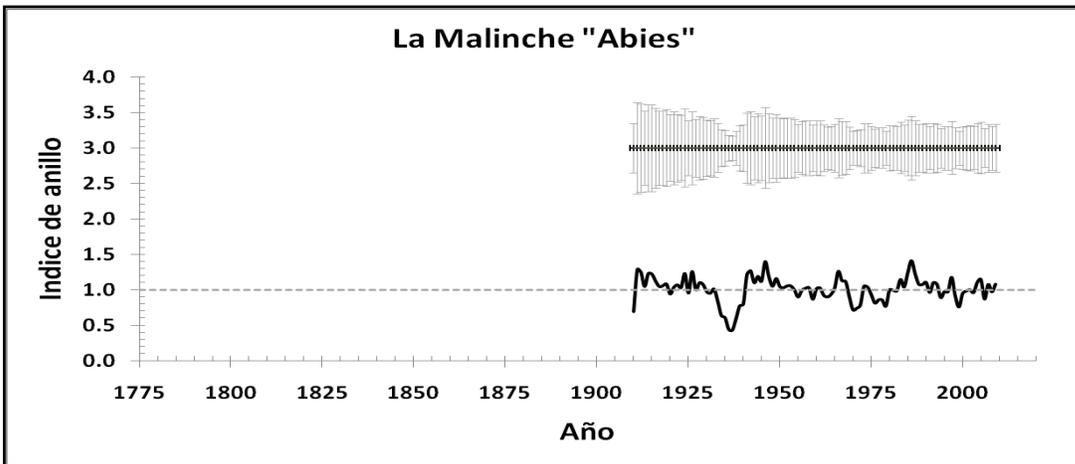


Figura 15. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en La Malinche.

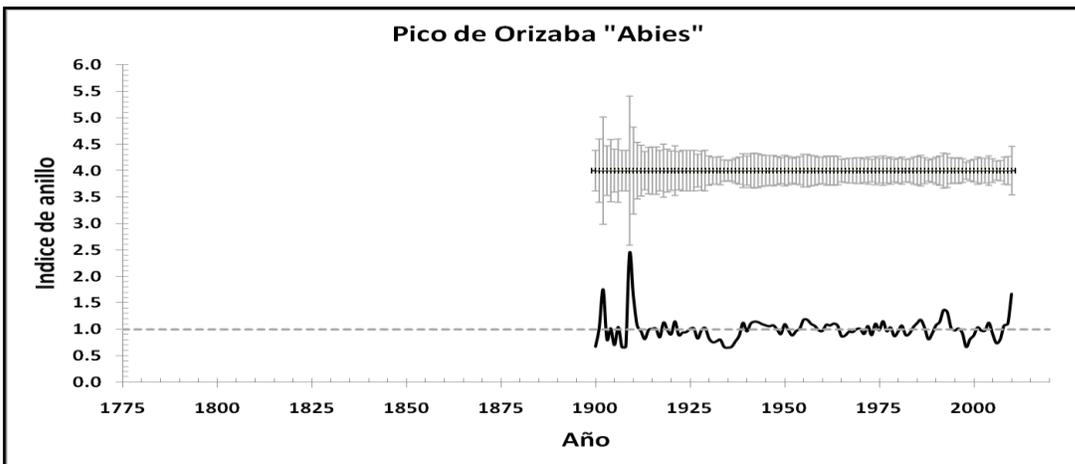


Figura 16. Índices de anillo de crecimiento para *Abies religiosa* en el Pico de Orizaba.

Las figuras 17 a la 22 muestran los IAC para pino en cada montaña. Los datos no muestran eventos de crecimiento paralelo entre montañas. Cada montaña muestra su propio patrón de crecimiento. Los individuos más longevos se colectaron en Nevado de Colima, Nevado de Toluca y Pico de Orizaba, mientras que los más jóvenes se colectaron en Pico de Tancítaro y Cerro Tlaloc. Es muy probable que esto se deba a las intervenciones que se tienen en los bosques ya que en estas montañas se tiene más historial en aprovechamientos maderables.

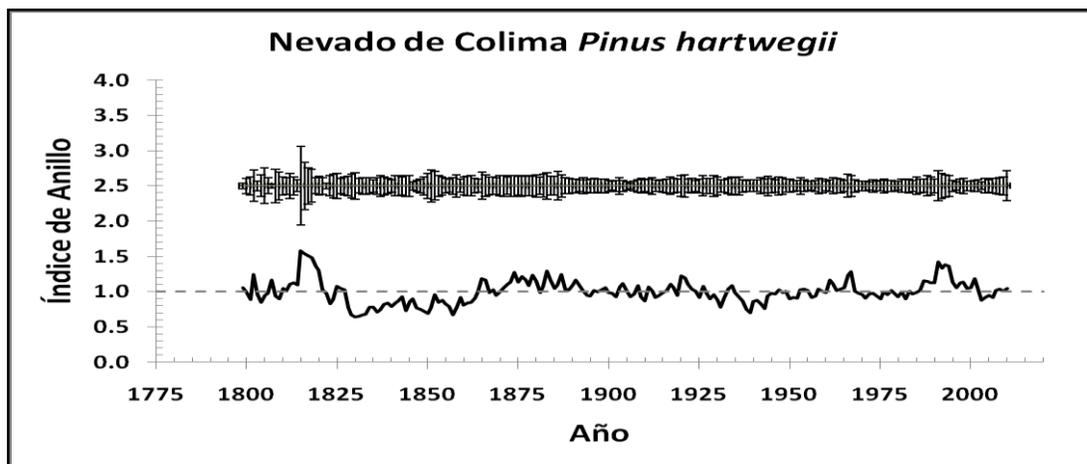


Figura 17. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en el Nevado de Colima.

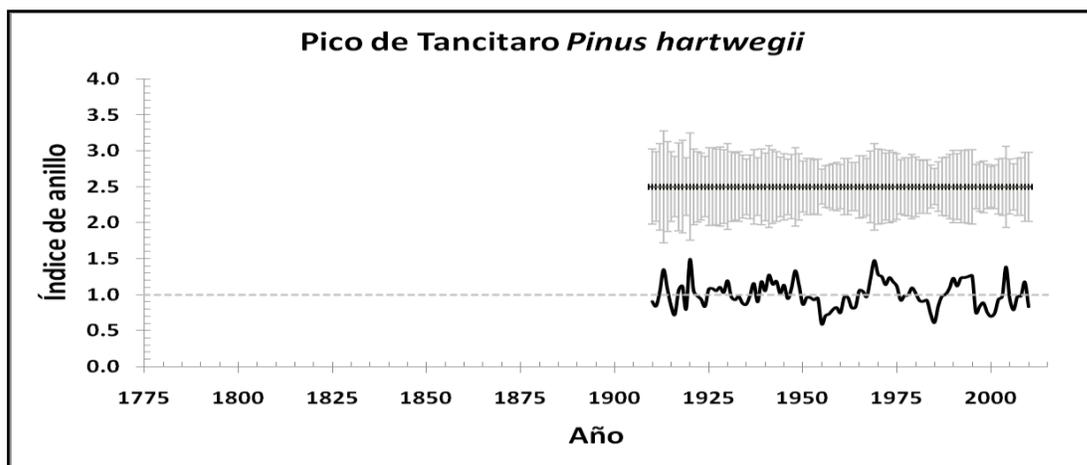


Figura 18. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en el Pico de Tancítaro.

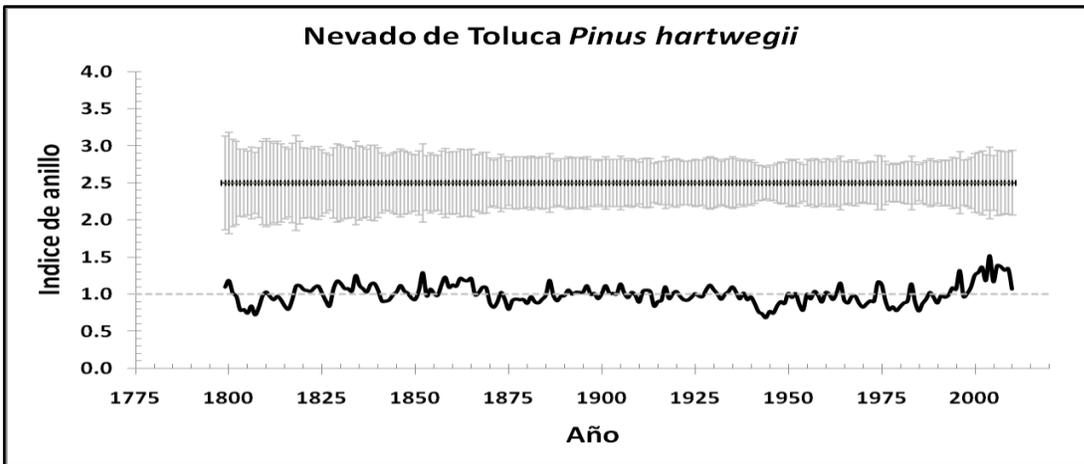


Figura 19. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en el Nevado de Toluca.

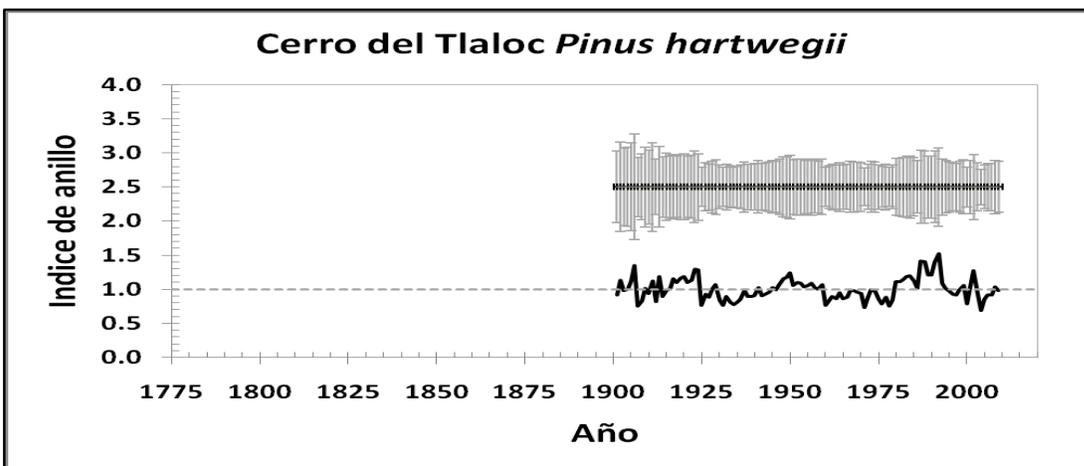


Figura 20. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en el Cerro Tlaloc.

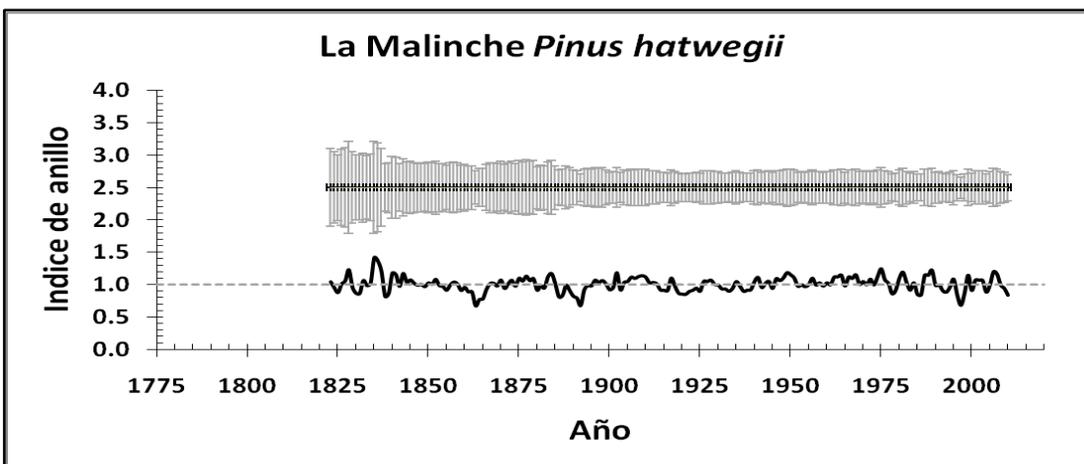


Figura 21. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en La Malinche.

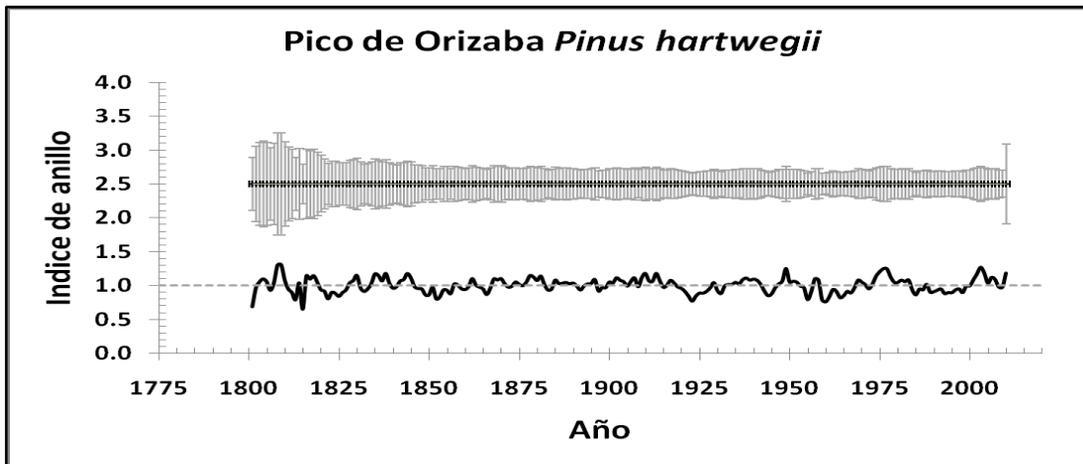


Figura 22. Índices de anillo de crecimiento para *Pinus hartwegii* en el Pico de Orizaba.

Un resultado relevante es la tendencia de mayor crecimiento de pino en los últimos años en Nevado de Toluca y en segundo término en la montaña Pico de Orizaba. Este resultado es similar al que sugieren McMahon et al. (2010), quienes pronostican incremento en crecimiento de algunos bosques como resultado del incremento en las temperaturas y un efecto de fertilización por los incrementos de CO<sub>2</sub>. Lo anterior, también influye en la eficiencia de uso de agua de las especies forestales.

### 6.3 Índices de anillo de crecimiento y variables meteorológicas

Las figuras 23 a la 28 muestran la relación de índices de anillo de pino y oyamel con la precipitación media anual. No se encontró relación con datos de temperatura. Oyamel fue la única especie que muestra cierto grado de correlación con la precipitación. Los resultados para oyamel son de la siguiente forma:

En Colima los datos de observación fueron de 1953 a 2008 y no se encontró correlación significativa con precipitación dentro de dicho periodo. En PT el periodo de datos fue de 1980 a 1997, y sólo en el periodo 1992 a 1997 se encontró una correlación de 0.67. En NT el periodo de datos fue de 1969 a 1986; pero sólo en el periodo 1974 a 1986 se encontró una correlación de 0.42. En CT el periodo fue de 1970 a 1980, pero hubo correlación sólo en el periodo 1977 a 1980 con una correlación de 0.52. En MA el periodo observado fue de 1967 a 1976 y no se muestra correlación. Finalmente, en PO, el periodo de observación de 1967 a 1986 y en el periodo de 1971 a 1978 se encontró una correlación de 0.71.

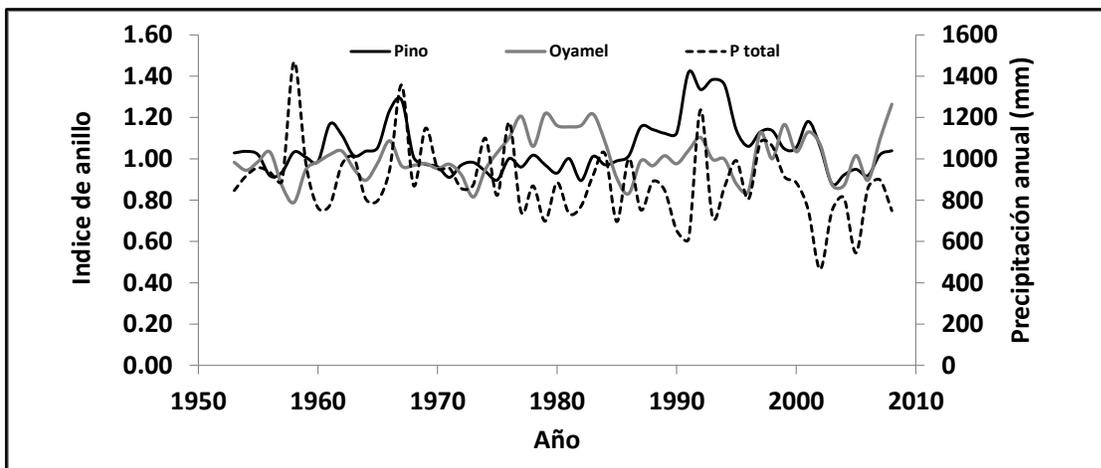


Figura 23. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Nevado de Colima.

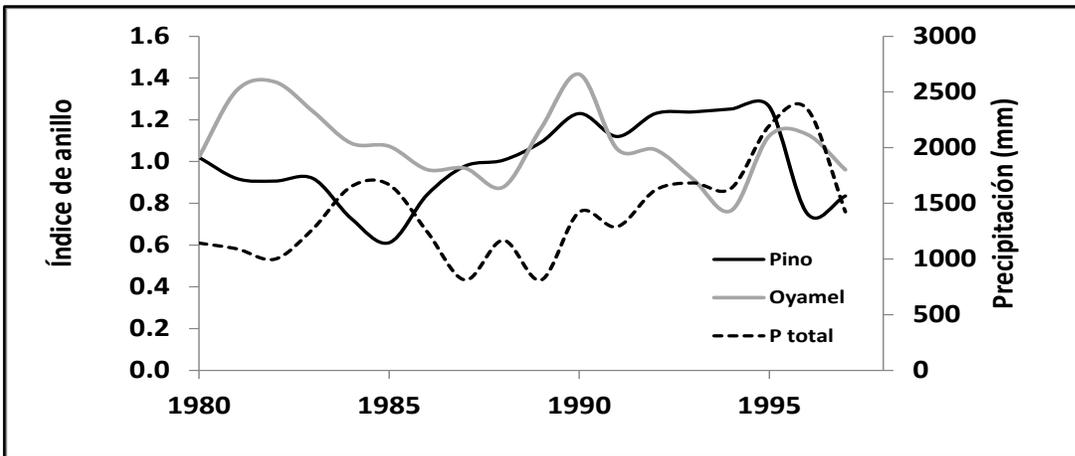


Figura 24. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Pico de Tancitaro.

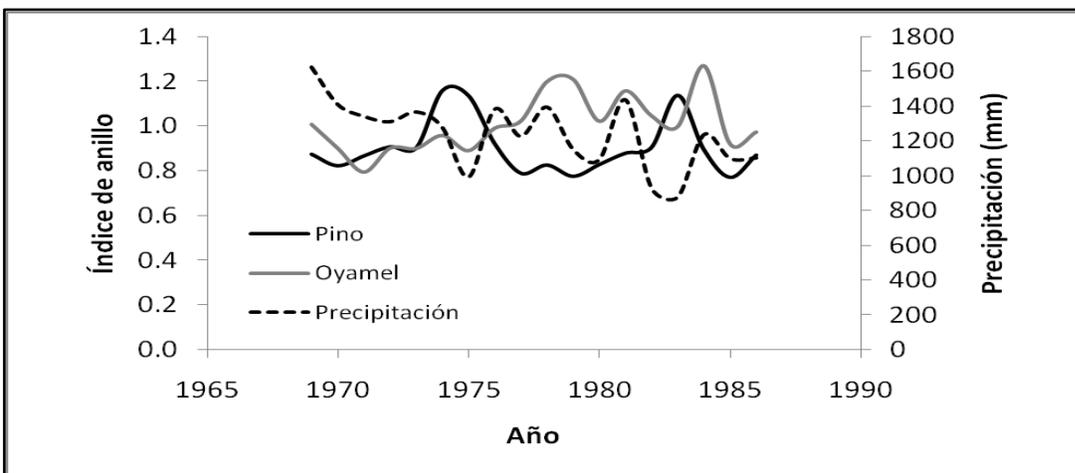


Figura 25. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Nevado de Toluca.

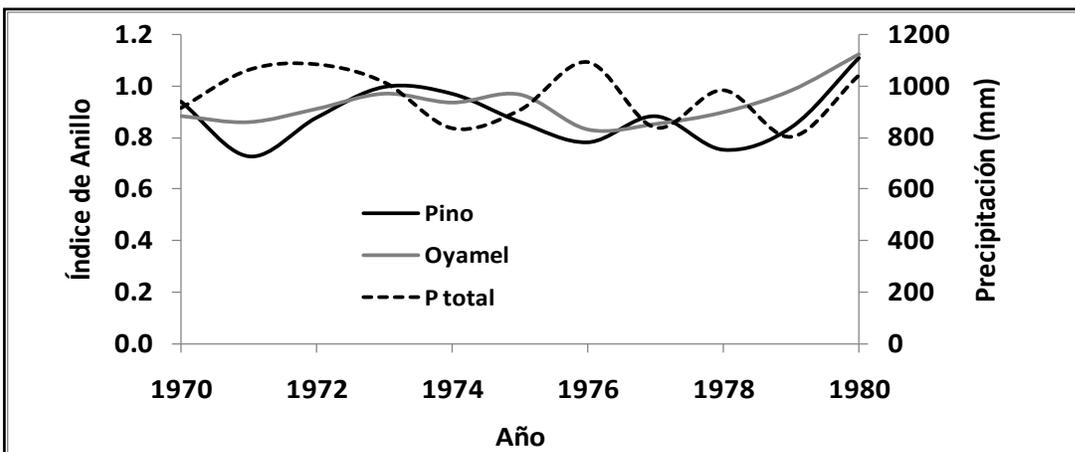


Figura 26. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Cerro Tláloc

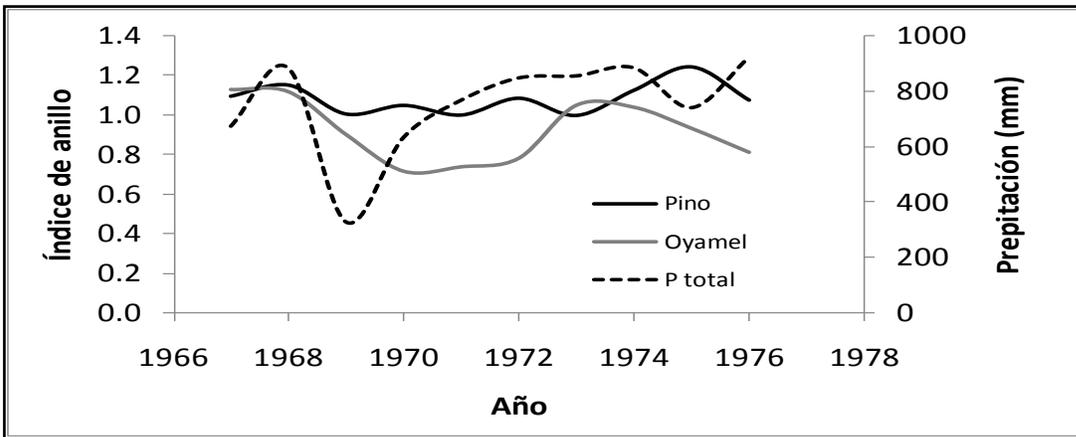


Figura 27. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para la Malinche.

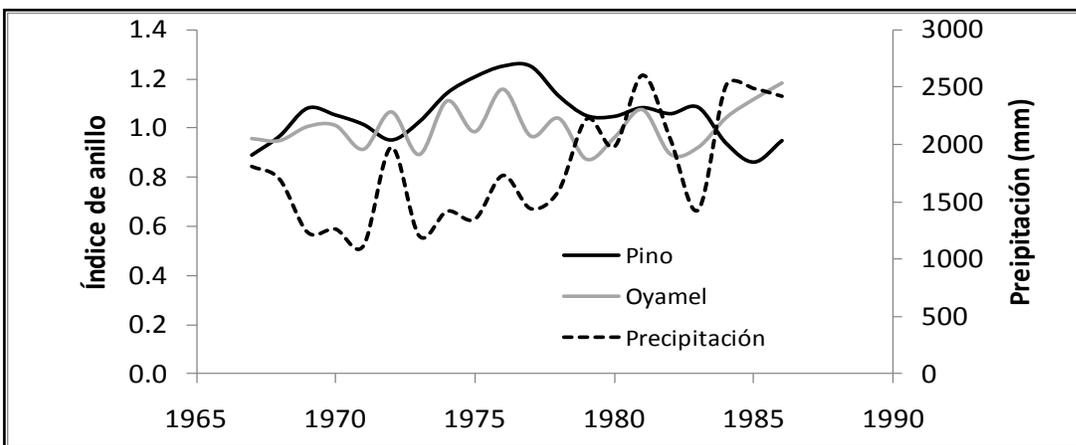


Figura 28. Relación de índices de crecimiento con precipitación media anual para el Pico de Orizaba.

Es posible que sólo se haya encontrado correlación entre precipitación y crecimiento de oyamel por tratarse de una especie que demanda mucha agua y es más sensible a las sequías. Estos resultados sugieren que para evaluar efectos de cambio climático en el corto plazo, *Abies religiosa* es una especie más adecuada, mientras que para periodos más largos, *Pinus hartwegii* es la especie conveniente.

Comparando los resultados de este trabajo con los de Diaz et al. (2001) destaca la importancia de contar con bases climáticas cercanas a las áreas de estudio. Desafortunadamente las bases climáticas en México son limitadas para establecer relaciones significativas entre los anillos de crecimiento y el clima. Arrela y Navar (2010) si encontraron una relación entre el ancho de anillos de *Pseudotsuga menziesii* con la precipitación. Esta relación podría explicar por una relación similar a la de oyamel que también es una especie con alta demanda de agua. Los anillos de crecimiento en *Pseudotsuga menziesii* se definen con mayor claridad en comparación con otras especies de coníferas, lo que también puede ayudar a incrementar la precisión en las mediciones y por ende mejorando la relación con variables climáticas. La relación entre el ancho de anillo y variables climáticas se obscurece por la influencia de otros factores y en algunos estudios las relaciones no explican más de 28% de la variación entre anillos y clima (Truet, 2010).

## VII. CONCLUSIONES

La tendencia de los índices de anillo de crecimiento fue diferente entre *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*. Existe una mayor variación en los índices de crecimiento de oyamel, comparados con los de pino. Además, se observó que aproximadamente en el año 1935 hubo un bajo crecimiento para ambas especies; lo cual puede ser una indicación de la afectación por algún factor ambiental. Cada montaña muestra un patrón específico de crecimiento en anillos. De tal forma que a través del tiempo, oyamel mostró mayor variación en los índices de crecimiento y un incremento en los últimos 3 años. En el caso de pino, sólo en las montañas del Nevado de Toluca y Pico de Orizaba se observó una tendencia de incremento en crecimiento del año 2000 a la fecha. De las dos especies, sólo en Oyamel se observó relación entre los índices de anillo y la precipitación total, lo que puede deberse a la sensibilidad de la especie en los cambios de humedad del suelo.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Alarcón, M. C. 1993. Estudio dendrocronológico de *Pinus hartwegii* Lindl en el Suroeste de la cuenca de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 62 p.
- Arreóla-Ortíz, M. R. y J. J. Návar-Cháidez. 2010. Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern y su asociación con El Niño en el Noreste de México. Boletín de Instituto de Geografía de la UNAM. 71: 7-20.
- Biondi, F.; I. Estrada-Galindo, J.C. Gavilanes-Ruiz y A. Elizalde-Torres. 2003. Tree growth response to the 1913 eruption of Volcan de Fuego de Colima, Mexico. Quaternary Research 59: 293-299.
- Bidwell, R.G.S.1983. Fisiología Vegetal. AGT editor, S.A. Segunda edición. Trad. Por Guadalupe Jerónimo Cano y Manuel Rojas Garcidueñas. México. 784 p.
- Constante, V. G., J. Villanueva D., J. Cerano J. Estrada A. 2010. Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto Técnico 19. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 40p.
- Cook, E., and K. Briffa. 1990. Data analysis. In: E. R. Cook and L. A. Kairiukstis (Eds.). Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publisher. Netherlands. p. 92-162.
- Díaz, S.C., R. Touchan y T.W. Swetnam. 2001. A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, México. International Journal of climatology 21:1007-1019.

- FAO-UNESCO. 1988. Soil map of the world. Revised legend of the FAO. International Soil Reference and Information Center. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 109 p.
- Fritts, H. C., E. A. Vaganov, I. V. Sviderskya, A. V. Shashkin. 1991. Climatic variation and tree-ring structure in conifers: empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density. *Climate Research* 1: 97-116.
- Fule, P. Z., M. Ramos-Gómez, C. Cortés-Montano y A. M. Miller. 2011. Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management. *Ecol. Appl.* 21: 764-775.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 217 p.
- Génova, M. F. 2007. El crecimiento de *Abies pinsapo* y el clima de Grazalema: aportaciones dendroecológicas. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16:145-157
- Harold, W. y Jr. Hocker. 1984. Introducción a la biología forestal. Primera edición. AGT Editor, S. A. Mexico. 446 p.
- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. México. 385 p.
- McMahon, S.M., G.G. Parker y D.R. Miller. 2010. Evidence for a recent increase in forest growth. *PNAS.* 107:3611-3615.
- Mooser, F. 1972. The Mexican volcanic belt-structure and tectonics. *Geofisica internacional* 12: 55-70.

- Ort, M. H., K. C. Anderson, M. A. Clyne, E. M. May. 2009. Multiple dendrochronological responses to the eruption of Cinder Cone. *Dendrochronology* 27: 213-221.
- Robinson, W. J., E. Cook, J. R. Pilcher, D. Eckstein, L. Kairiukstis, S. Shyatou, and D. A. Norton. 1990. Some historical background on dendrochronology. *In*: E. R. Cook and L. A. Kairiukstis (Eds.). *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publisher. Netherlands. p. 1-21.
- Rzedowski, J. 1981. *Vegetación de México*. Primera Edición. Editorial Limusa. Mexico. 432 p.
- SARH. 1993. *Diagnóstico del Parque Nacional Pico de Orizaba, Ver.* Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Consultoría Multidisciplinaria, S.A. de C.V. México. 86 p.
- Spurr, S. H. y Barnes, B. V. 1982. *Ecología forestal*. Tercera Edición. AGT editor. S.A. Mexico. 690 p.
- Stephens, S. L., C. N. Skinner, and S. J. Gill. 2003. Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine: Mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Can. J. For. Res.* 33: 1090-1101.
- Trouet, V., J. Esper, H. Beckma. 2010. Climate/growth relationships of *Brachystegias piciformis* from the miombo woodland in south central Africa. *Dendrochronologia* 28:161–171.
- Vargas, M.F. 1984. *Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes. Pasado, presente y futuro*. Colección: Grandes Problemas Nacionales.

Serie: Los Bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas.  
UNAM. México. 266 p.

Villanueva, D. J., J. Cerano P., D. W. Stahle, V. Constante G. y J. Estrada A. 2010.  
Estandarización y desarrollo de series dendrocronológicas en México.  
Folleto técnico 16. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,  
Agrícolas y Pecuarias. México. 55 p.

Villanueva, J. D., J. Cerano P., D. W. Stahle, J. E. estrada A. y V. Constante G.  
2008. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco  
y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto científico 23.  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.  
México. 49 p.

## IX. APÉNDICE

En las siguientes figuras, los prefijos indican lo siguiente:

CT= Cerro Tláloc

MA= La malinche

NC, NC1,NC2 y NC3=Nevado de Colima

NT y NT1=Nevado de Toluca

PO1, PO3 y PO4 = Pico de Orizaba

PT y PT1= Pico de Tancítaro.

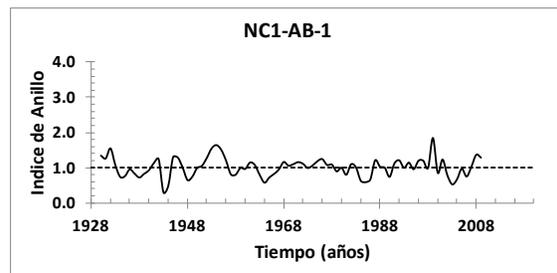
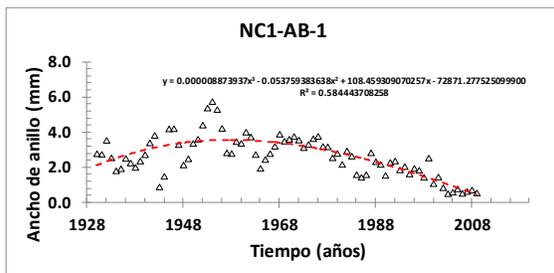
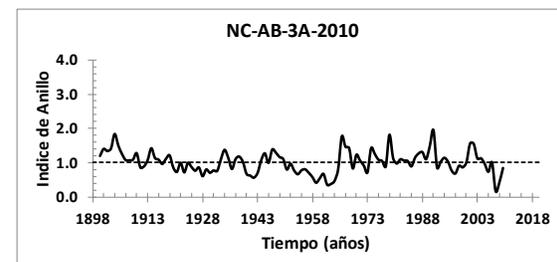
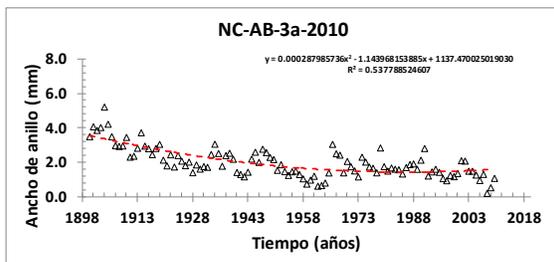
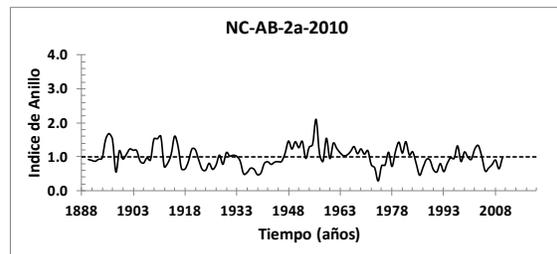
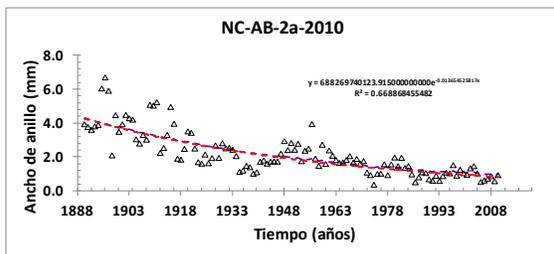
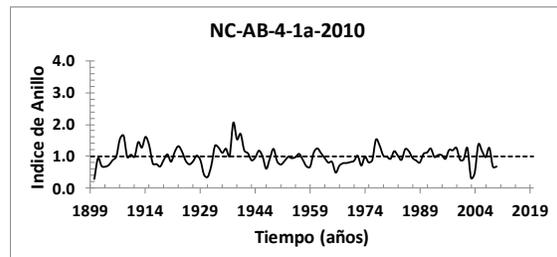
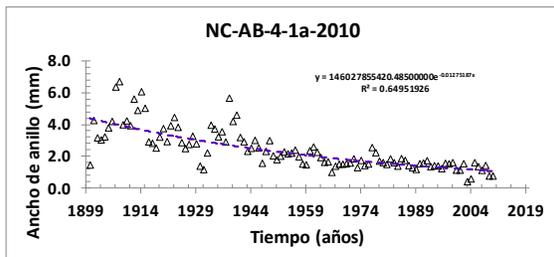
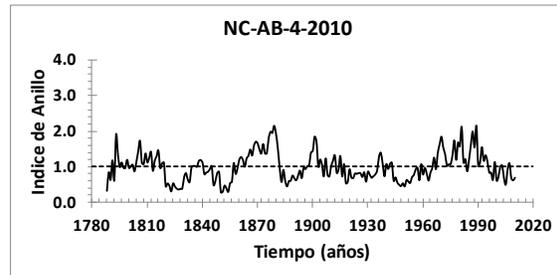
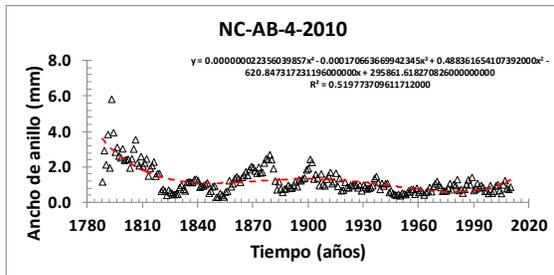
Especie:

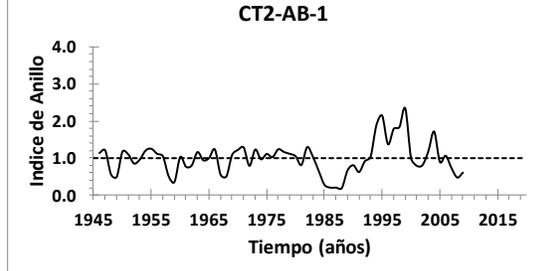
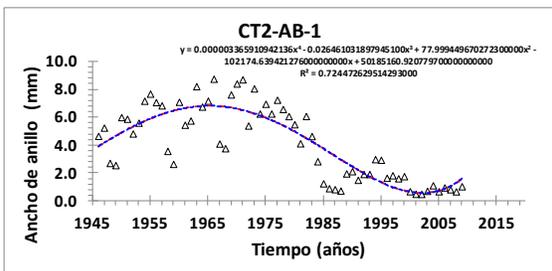
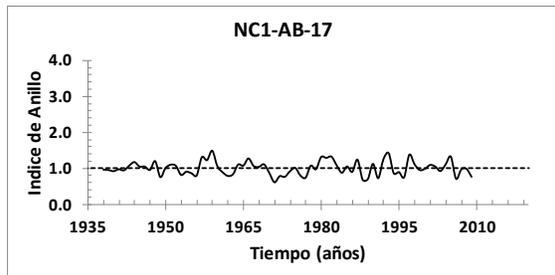
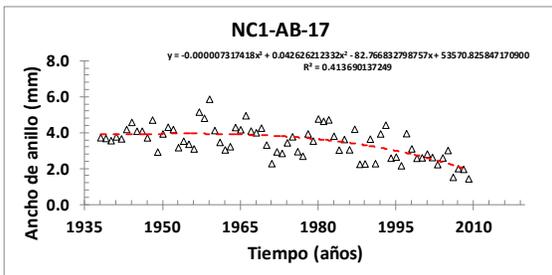
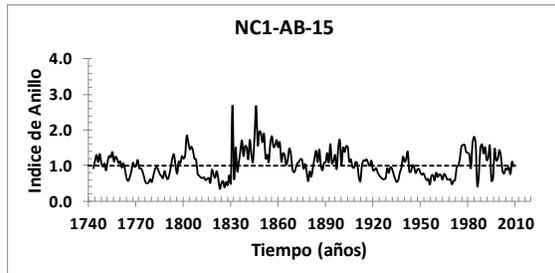
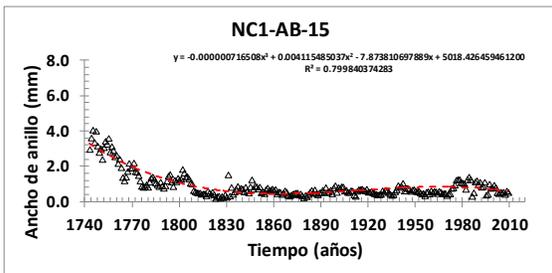
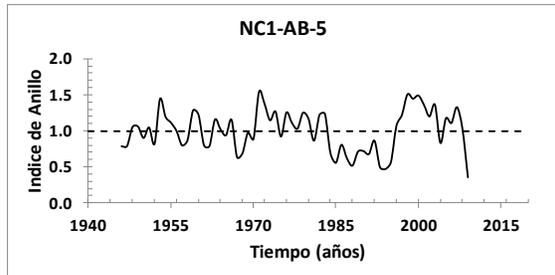
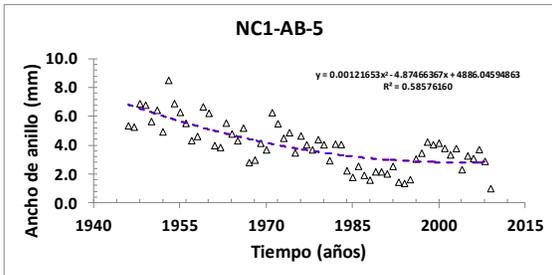
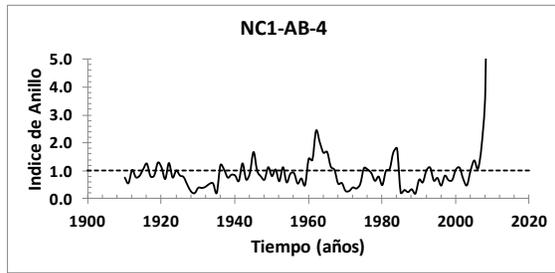
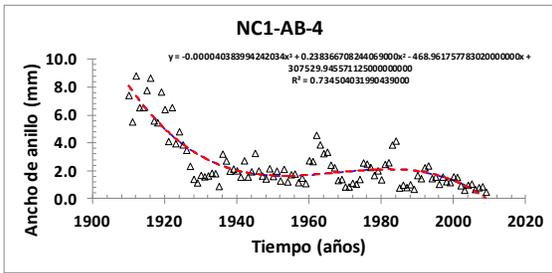
PI=Pino

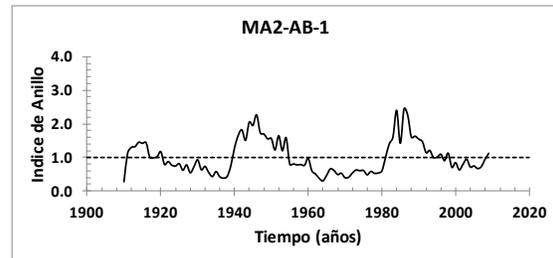
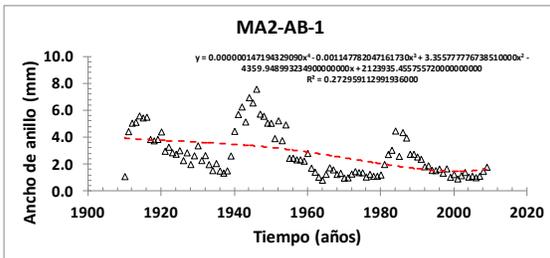
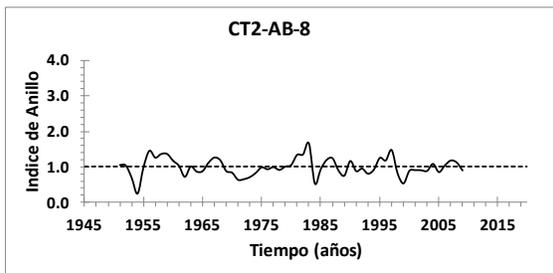
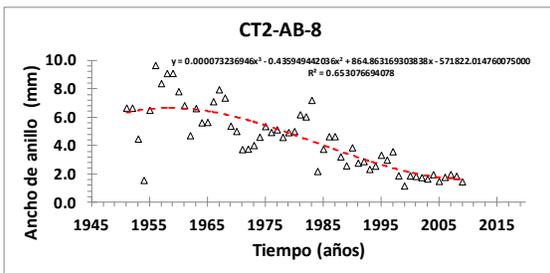
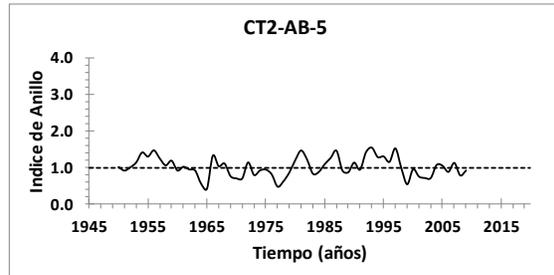
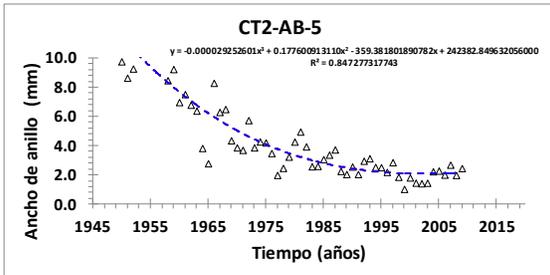
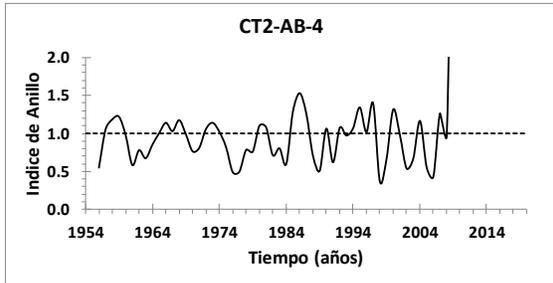
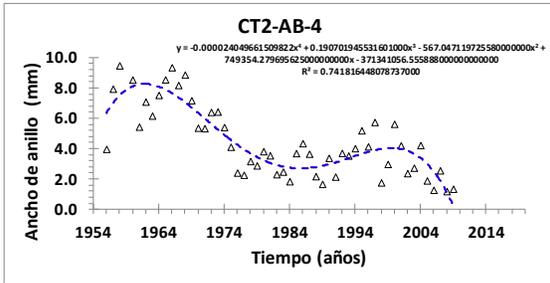
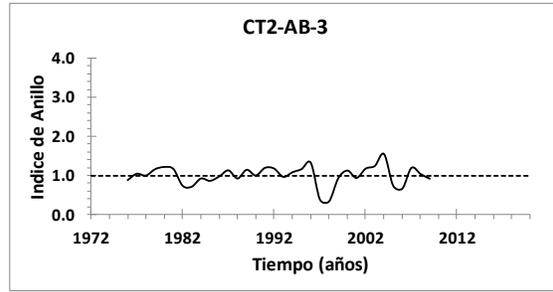
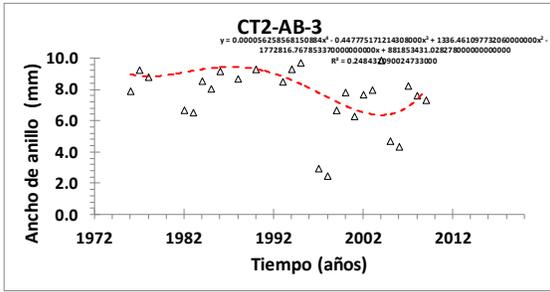
AB=Oyamel

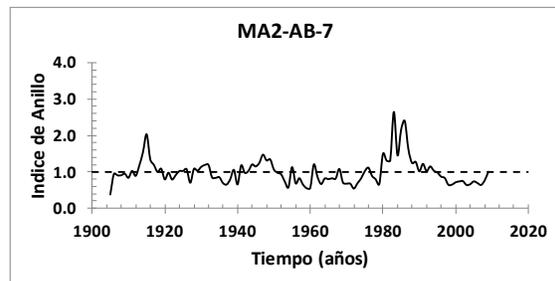
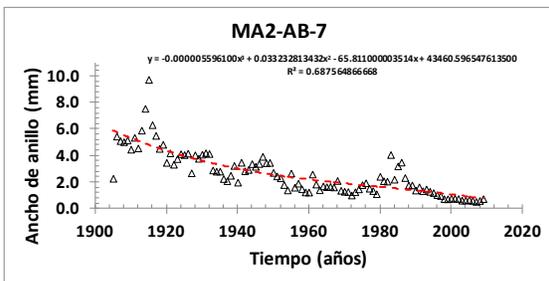
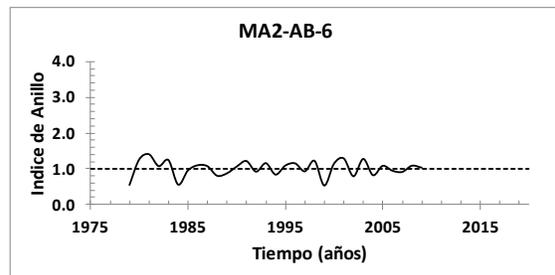
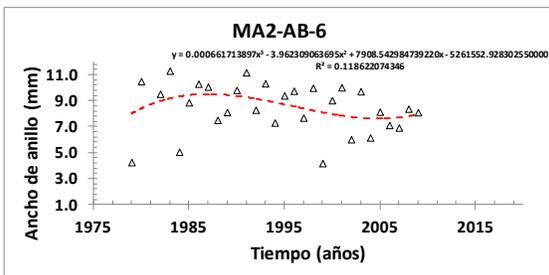
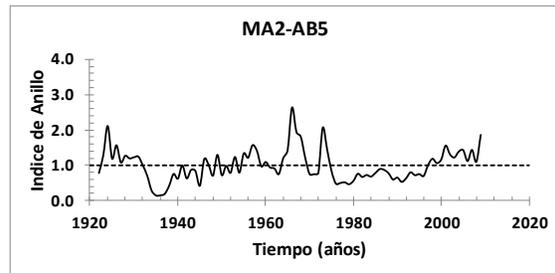
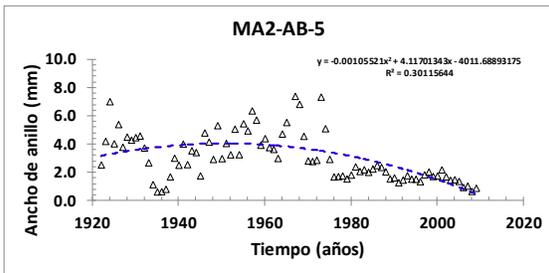
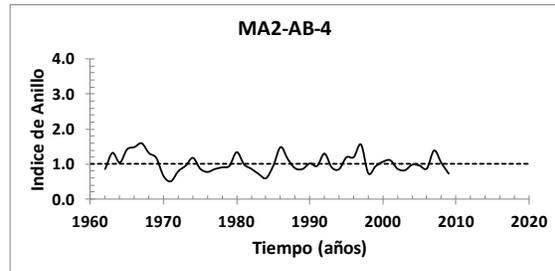
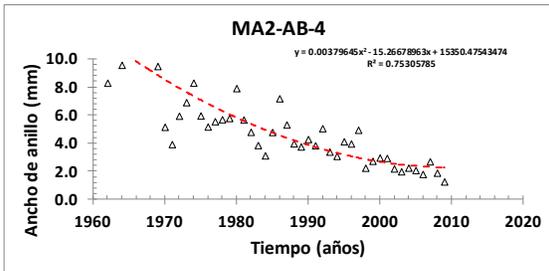
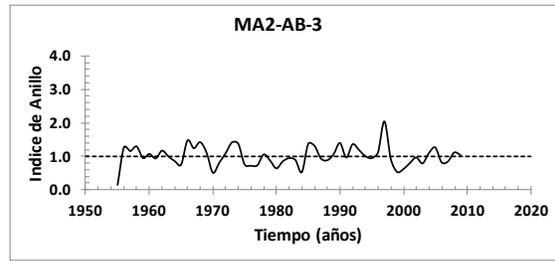
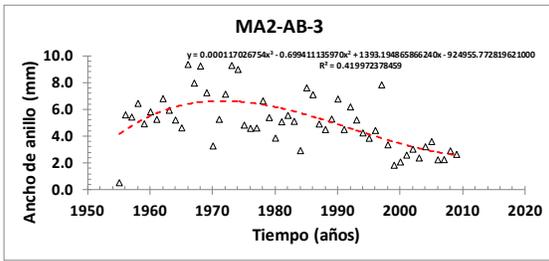
El número al final corresponde a la identificación para fines de control.

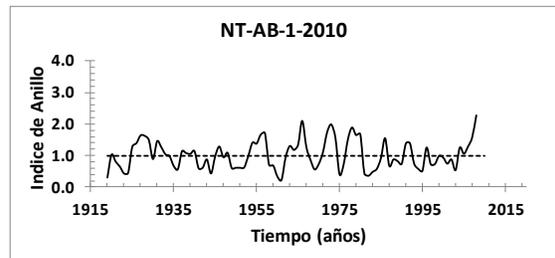
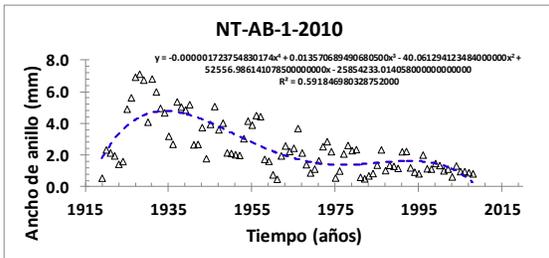
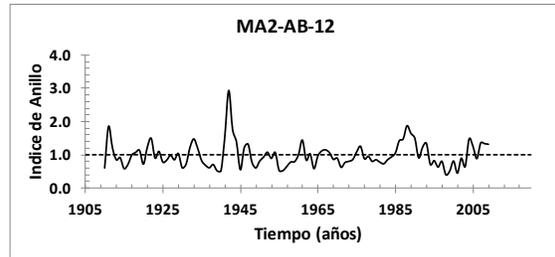
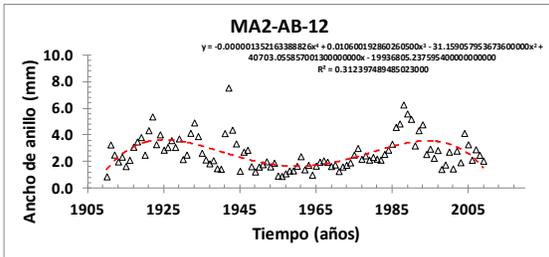
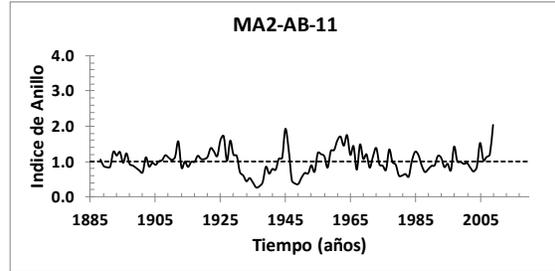
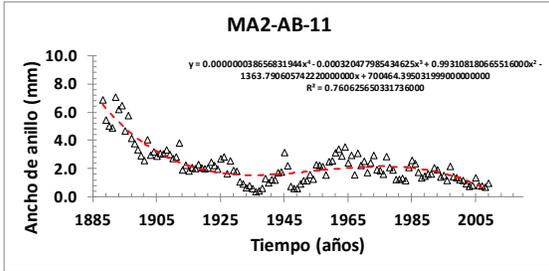
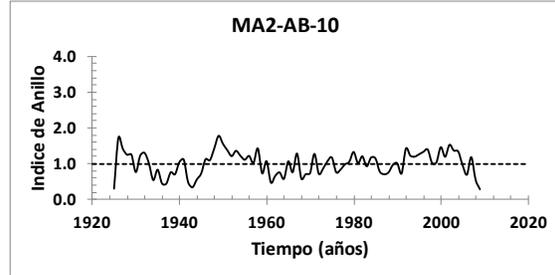
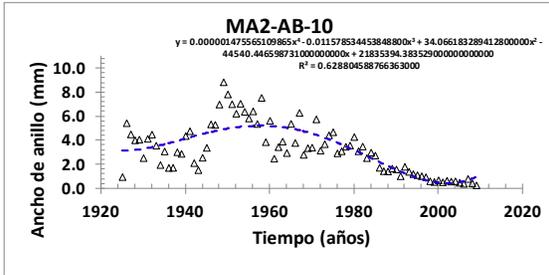
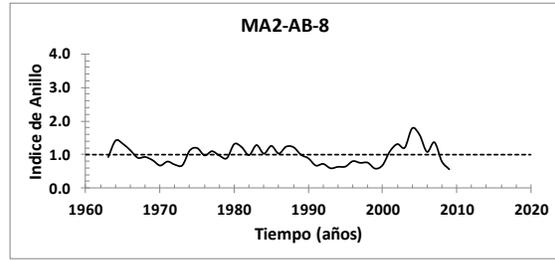
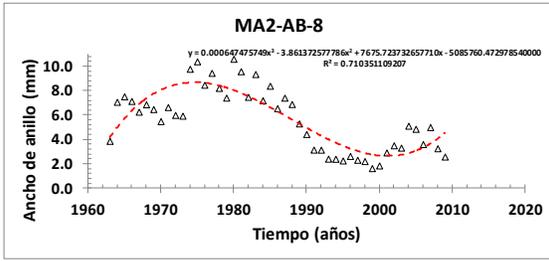
Gráficas *Abies religiosa* (oyamel) Ancho de anillo-Índice de anillo

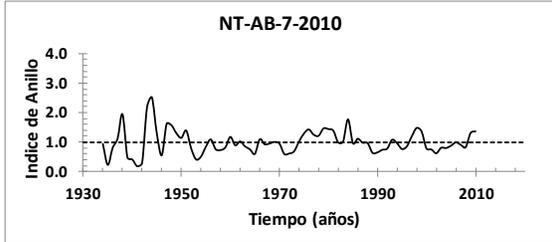
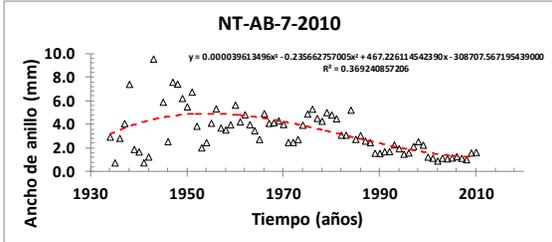
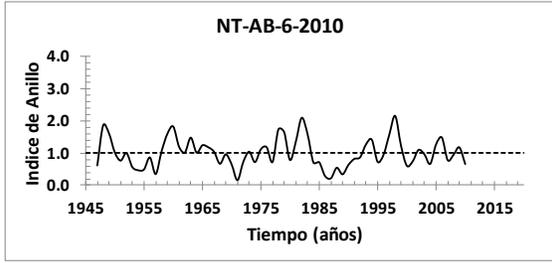
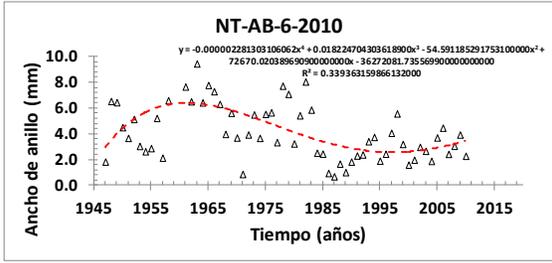
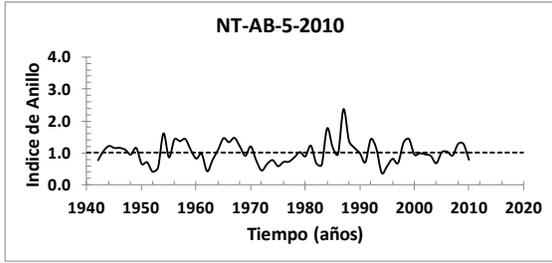
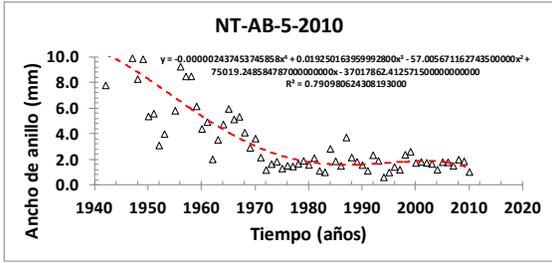
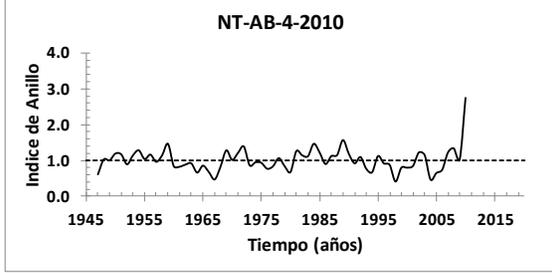
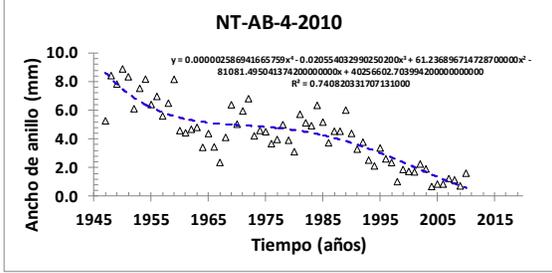
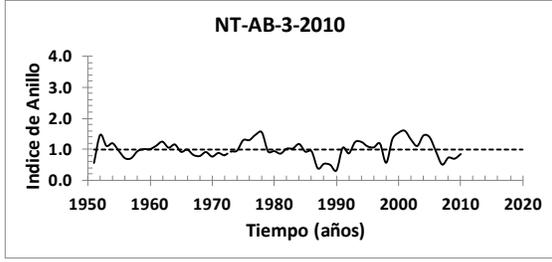
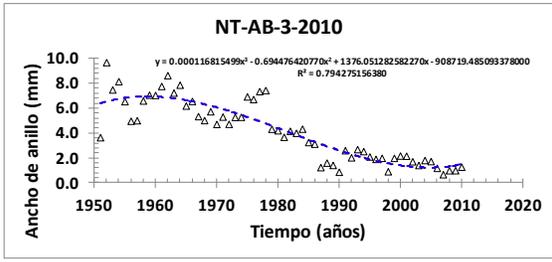


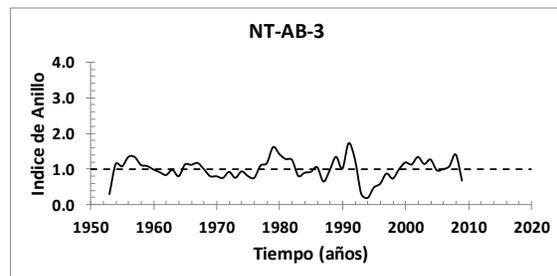
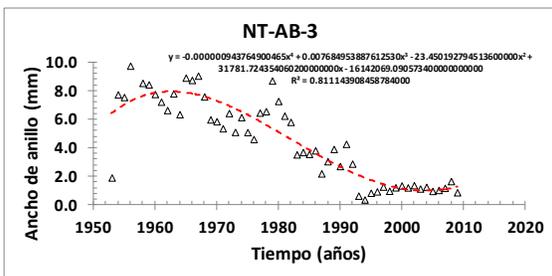
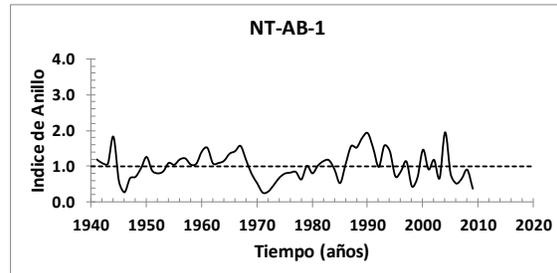
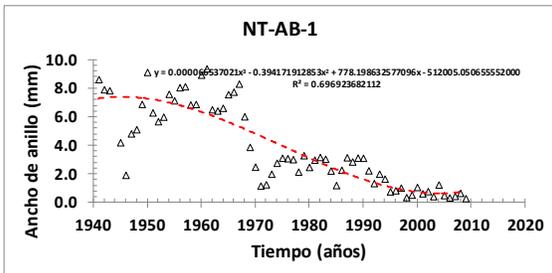
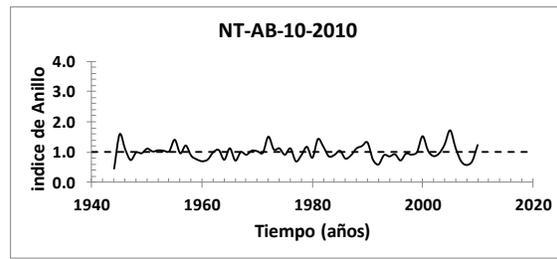
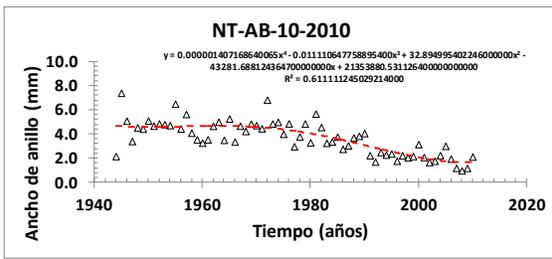
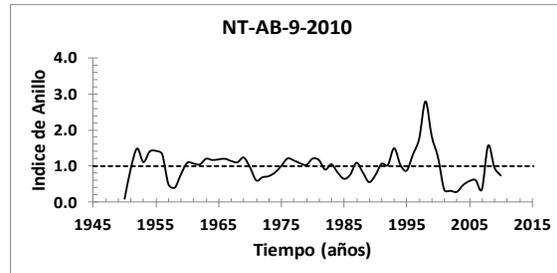
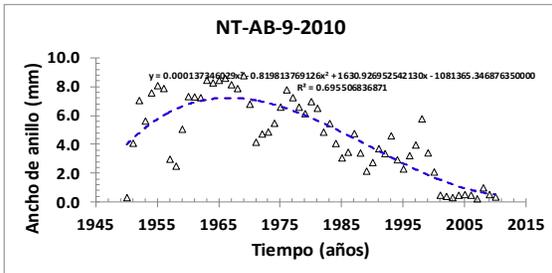
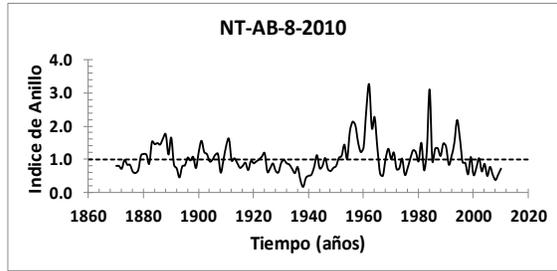
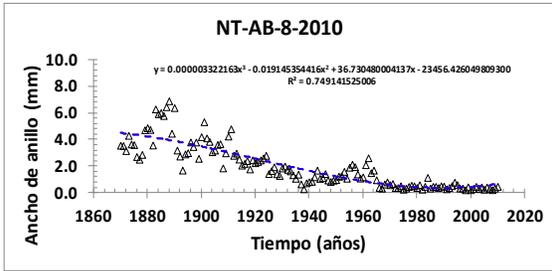


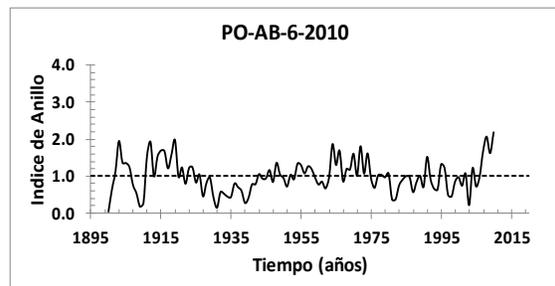
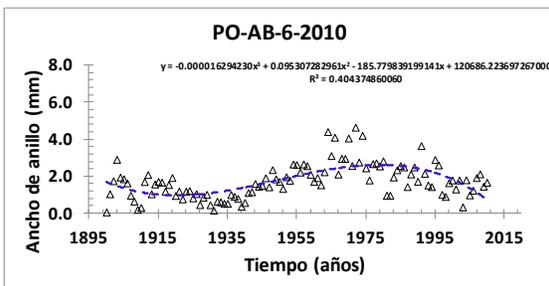
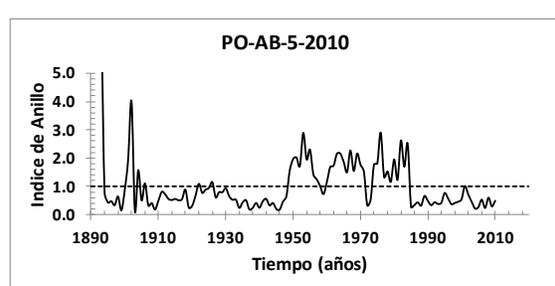
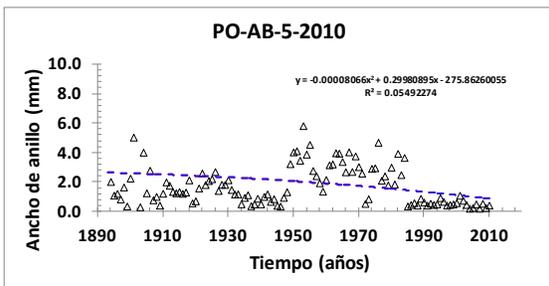
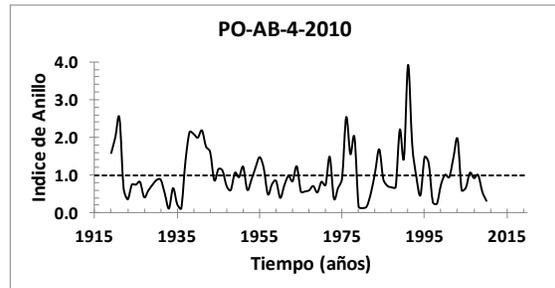
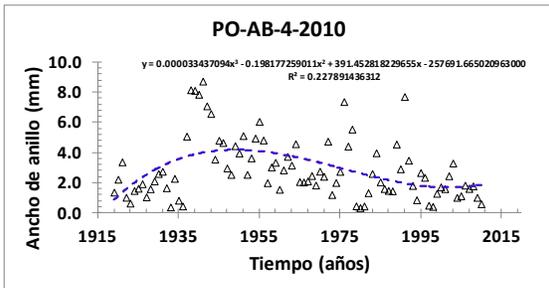
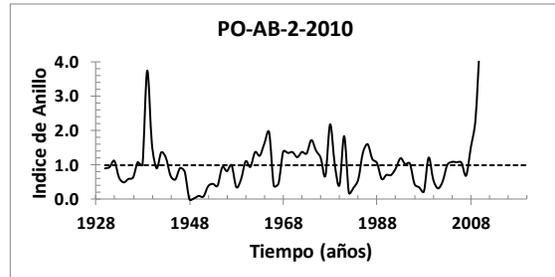
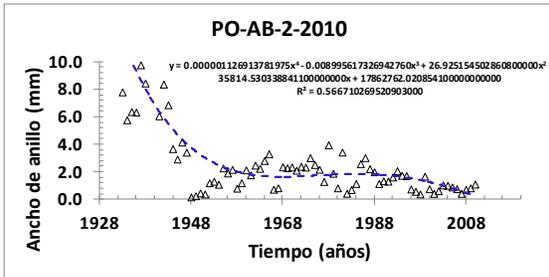
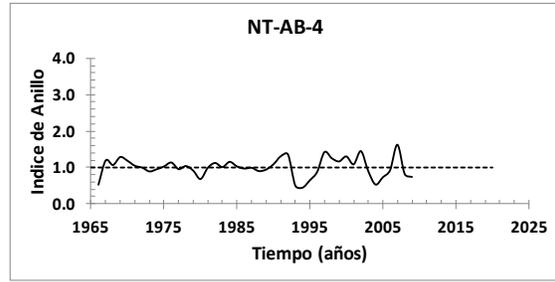
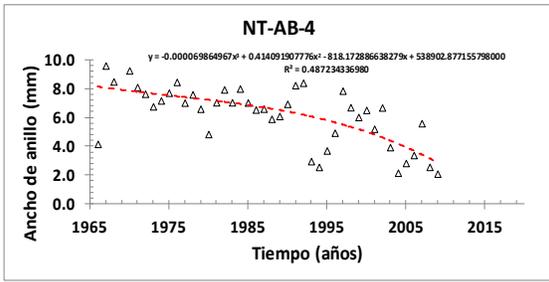


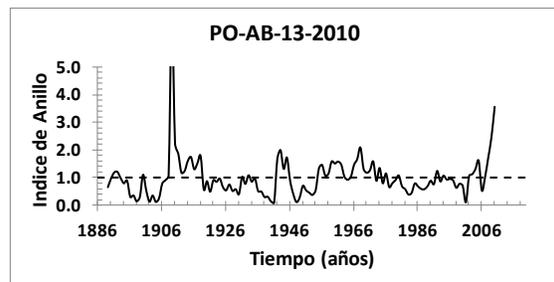
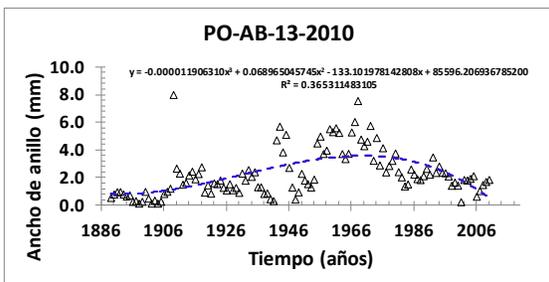
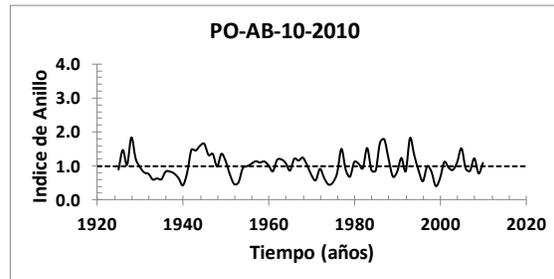
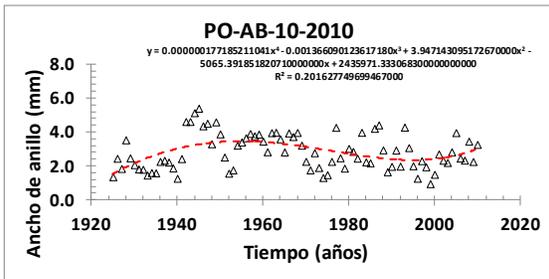
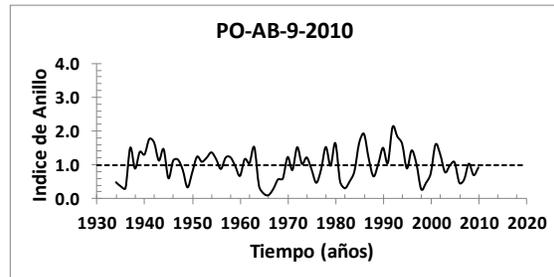
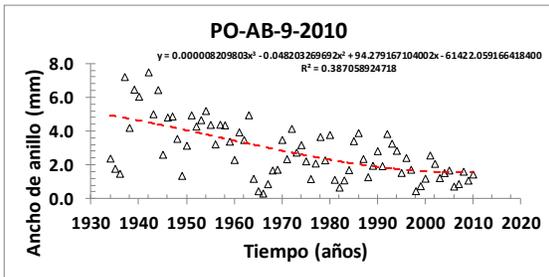
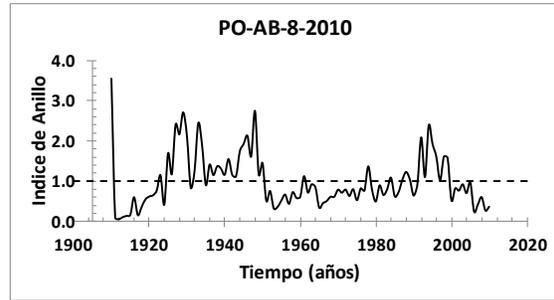
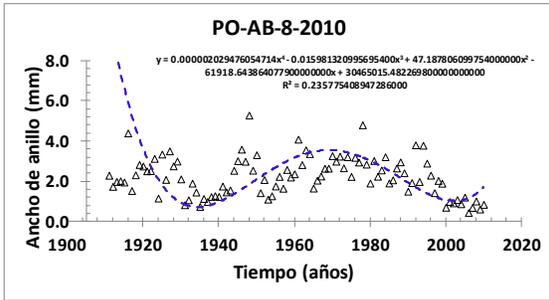
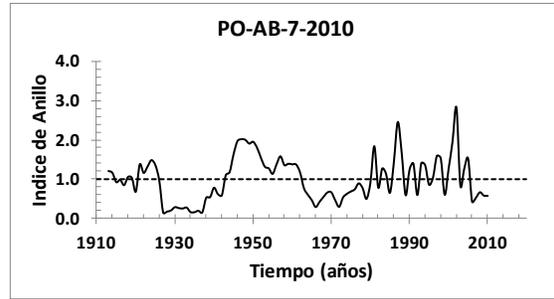
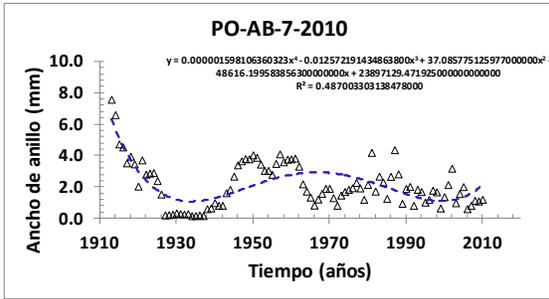


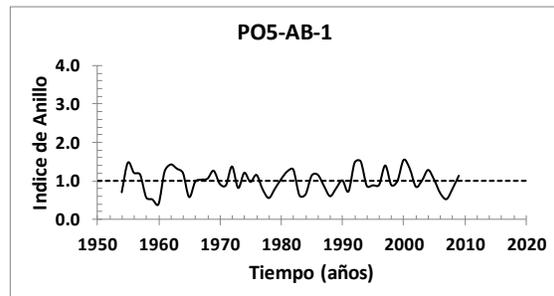
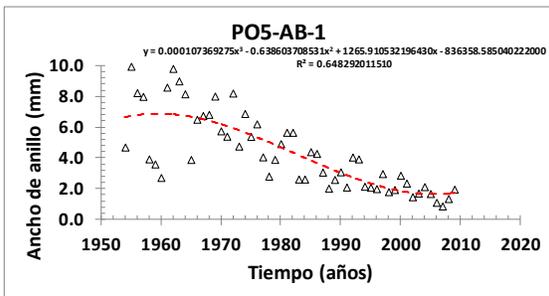
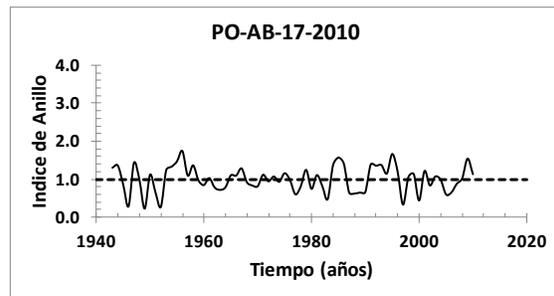
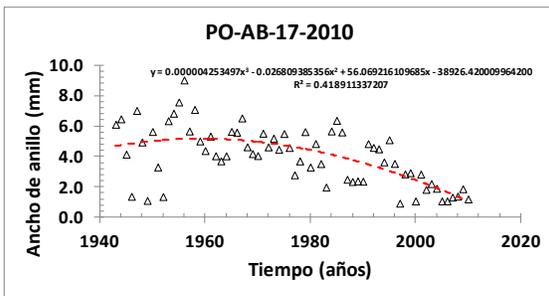
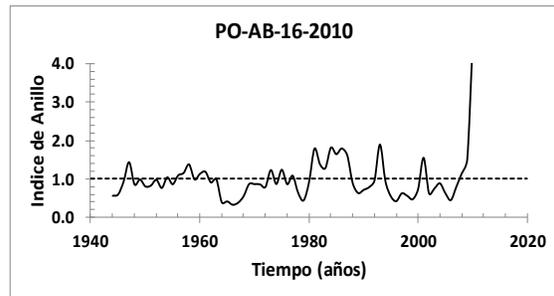
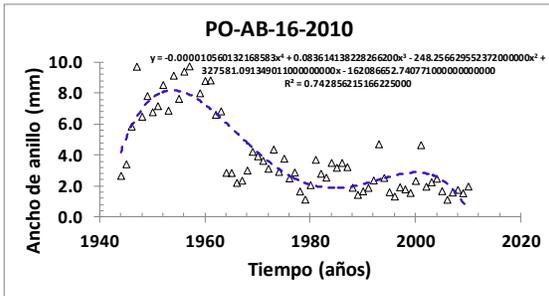
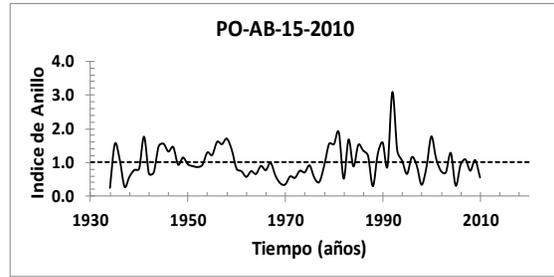
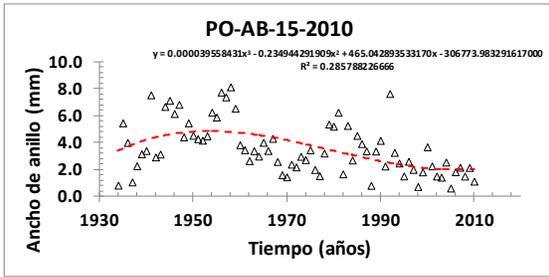
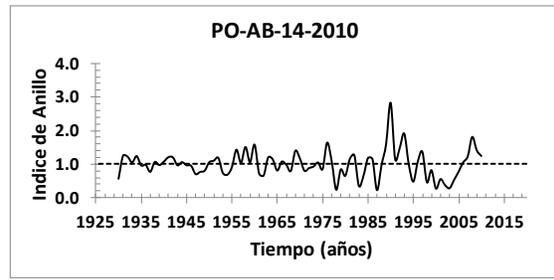
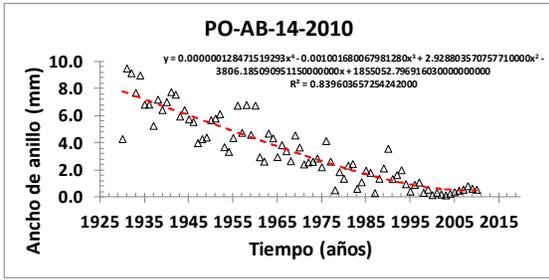


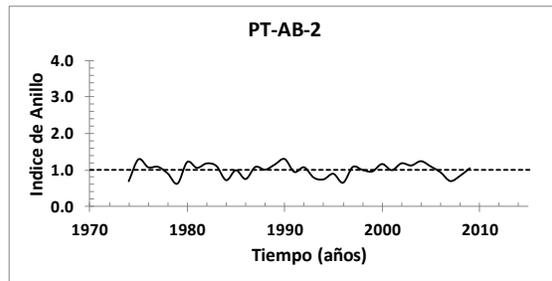
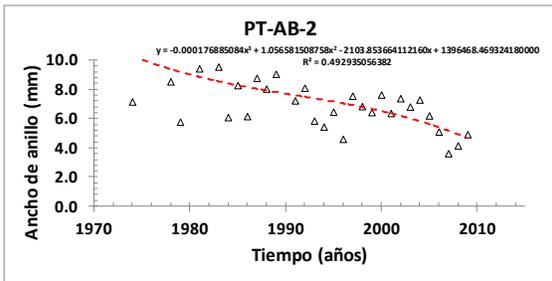
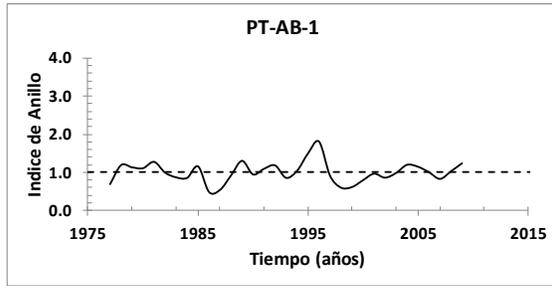
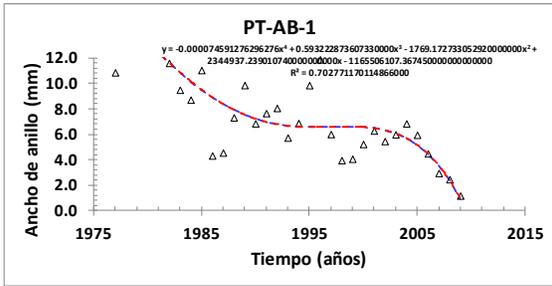
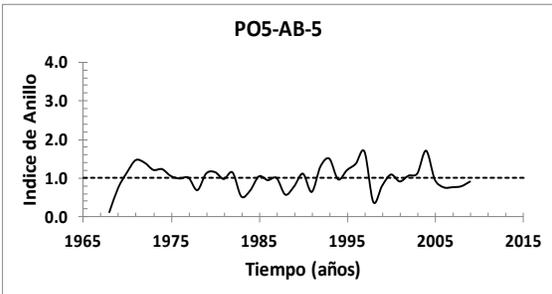
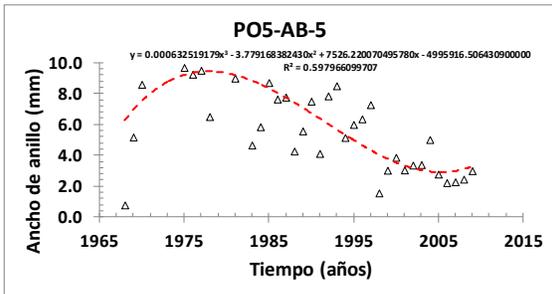
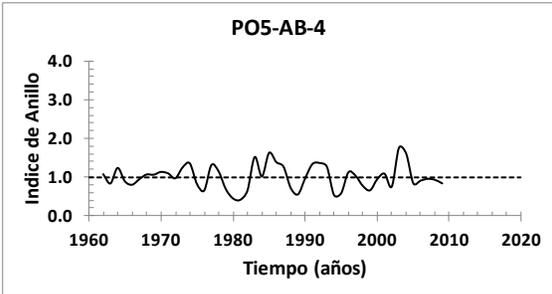
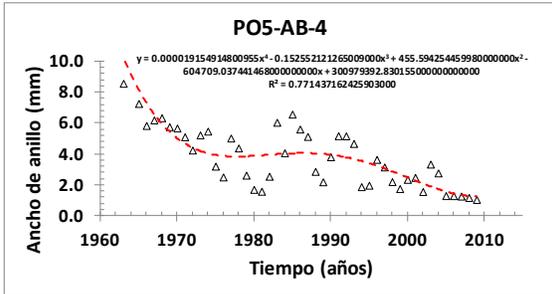
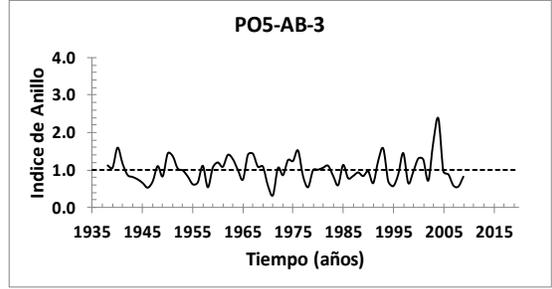
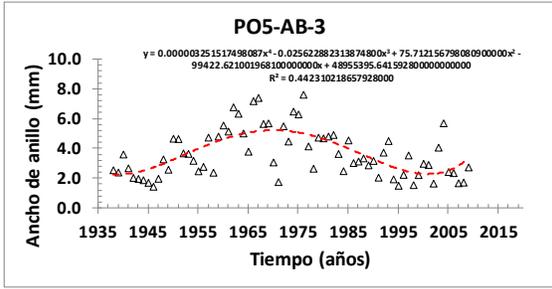


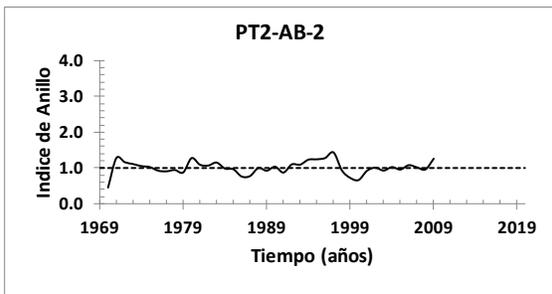
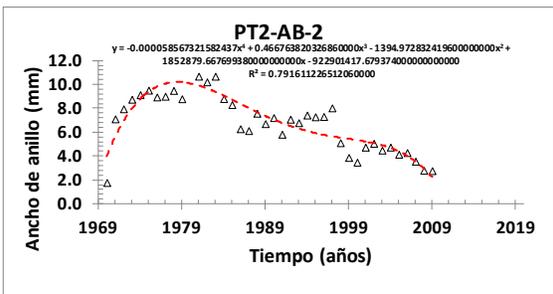
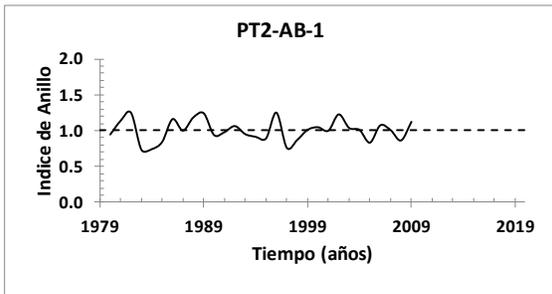
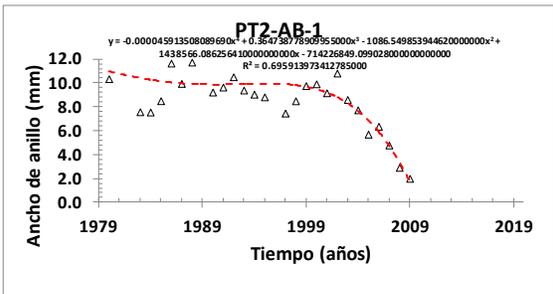
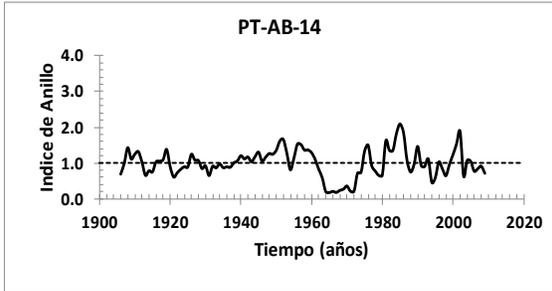
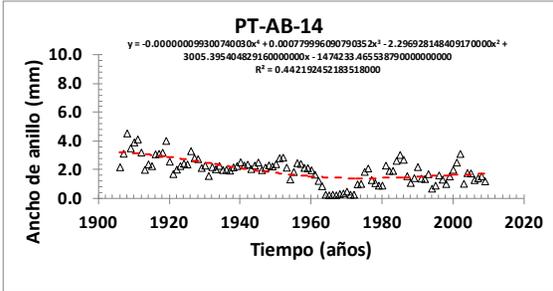
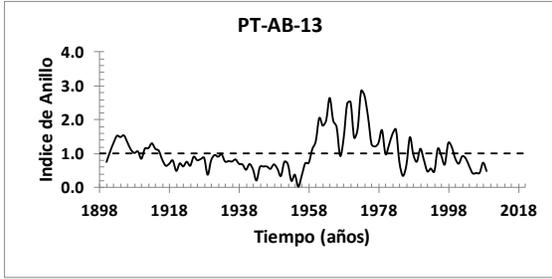
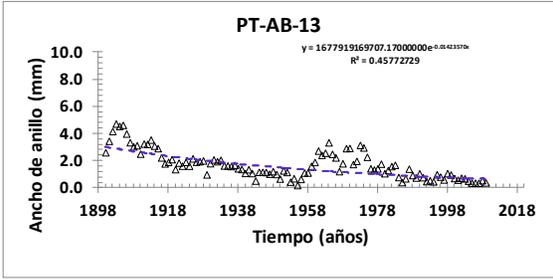
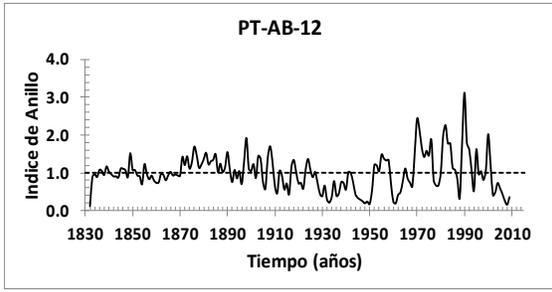
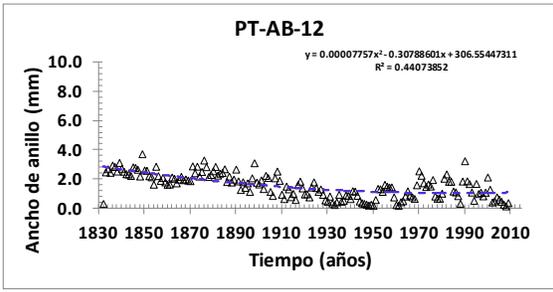












Gráficas *Pinus hartwegii* (pino) Ancho de anillo-Índice de anillo

