



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN  
LOS PARQUES NACIONALES DESIERTO DE LOS  
LEONES Y AJUSCO Y SU POSIBLE RELACIÓN CON LOS  
ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *Pinus sp.*

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
B I Ó L O G O  
P R E S E N T A:  
JORGE ANDRÉS HERNÁNDEZ AGUIRRE



DIRECTOR : M. EN C. GERMÁN CALVA  
VÁSQUEZ

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## ÍNDICE DE CONTENIDO

**Agradecimientos.**

**I. Resumen.**

**II. Introducción.**

**III. Antecedentes.**

**IV. Marco Teórico.**

**4.1 Clima en el Centro de México.**

**4.2 Clima de la Ciudad de México.**

**4.3 El Niño y La Niña.**

**4.4 Crecimiento Estacional de las Coníferas.**

**4.4.1. Formación de anillos.**

**4.5 Fotosíntesis y Respiración.**

**4.6 Carbohidratos, Grasas y Proteínas.**

**4.7 Asimilación.**

**4.8 Dendrocronología.**

**4.9 Dendroclimatología.**

**4.10 *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & *Pinus patula* Schl. et Cham.**

**V. Problema.**

**VI. Hipótesis.**

**VII. Objetivos.**

**VIII. Método.**

**8.1 Áreas de Estudio.**

**8.2 Fase de Campo.**

**8.3 Fase de Laboratorio.**

#### **8.4 Fase de Gabinete.**

### **IX. Resultados.**

#### **9.1 Cronologías del Ajusco y Desierto de los Leones.**

#### **9.2 Temperaturas Máximas para primavera y verano.**

#### **9.3 Temperaturas Mínimas para primavera y verano.**

#### **9.4 Precipitaciones en primavera y verano.**

#### **9.5 Ciclos de 10 años en Ganancias de los Anillos, Precipitaciones y Temperaturas.**

#### **9.6 Índices de Sensibilidad Media.**

#### **9.7 Análisis de Regresión Múltiple de las Ganancias.**

#### **9.8 Análisis de Regresión Múltiple de las Medias de Sensibilidad.**

### **X. Discusión.**

### **XI. Conclusiones.**

### **XII. Referencias.**

### **XIII. Anexos.**

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Principales estudios.

Tabla 2. Áreas de estudio.

Tabla 3. Valores por décadas del crecimiento arbóreo de *Pinus sp.*, en el parque Ajusco.

Tabla 4. Valores por décadas del crecimiento arbóreo de *Pinus sp.*, en el parque Desierto de los Leones.

Tabla 5. Correlaciones de las Ganancias del Ajusco con precipitación y temperaturas.

Tabla 6. Correlaciones de las Ganancias del DDLL con precipitación y temperaturas.

Tabla 7. Correlaciones de la Media de Sensibilidad del Ajusco con precipitación y temperaturas.

Tabla 8. Correlaciones de la Media de Sensibilidad del DDLL con precipitación y temperaturas.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura . Climas de la Cuenca de México.

Figura . Línea de tiempo de cambios en los patrones de temperatura y precipitación.

Figura . Estructura de la madera.

Figura . Variación estacional en la formación de madera.

Figura . Distribución anatómica de las células del xilema, cambium y floema para coníferas.

Figura . Núcleo extraído de pino.

Figura . Estructura interna de la madera.

Figura . Demostración grafica de la dendrocronología.

Figura . *Pinus teocote*.

Figura . *Pinus patula*.

Figura . Mapa de Zonas de Estudio.

Figura . Rodal elegido para recolectar las muestras de pino en el parque Cumbres del Ajusco.

Figura . Extracción de los núcleos de los pinos.

Figura . Montado de núcleos en bastidores de madera.

Figura . Lijado de madera.

Figura . Medición de los anillos de crecimiento mediante el software WinDENDRO®.

Figura . Dendrocronología de *Pinus sp.*, colectados en el parque Ajusco.

Figura . Dendrocronología de *Pinus sp.*, colectados en el parque DDLL.

Figura . Periodo de 1876 a 1916 de temperaturas máximas.

Figura . Periodo de 1916 a 1974 de temperaturas máximas.

Figura . Periodo de 1974 a 2016 de temperaturas máximas.

Figura . Periodo de 1876 a 1916 de temperaturas mínimas.

Figura . Periodo de 1916 a 1974 de temperaturas mínimas.

Figura . Periodo de 1974 a 2016 de temperaturas mínimas.

Figura . Periodo de 1876 a 1905 de precipitaciones.

Figura . Periodo de 1906 a 1944 de precipitaciones.

Figura . Periodo de 1945 a 1980 de precipitaciones.

Figura . Periodo de 1981 a 2016 de precipitaciones.

Figura . Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el Ajusco, comparadas con tasas de cambio de precipitación.

Figura . Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el DDLL, comparadas con tasas de cambio de precipitación.

Figura . Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el Ajusco, comparadas con temperaturas máximas y mínimas.

Figura . Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el DDLL, comparadas con temperaturas máximas y mínimas.

Figura . Índice de sensibilidad media de los pinos colectados en el parque Ajusco.

Figura . Índice de sensibilidad media de los pinos colectados en el parque DDLL.

Figura . Salida de datos en Excel divididos en décadas.

Figura . Rodal de pinos muestreados en el Desierto de los Leones.

Figura . Ejemplar de *Pinus patula* en el parque Ajusco.

Figura . Rodal de pinos en el parque Ajusco.

Figura . Extracción de núcleo de un pino en el Ajusco.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto de tesis se realizó con financiamiento de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México, Proyecto SECITI/103/2017.

Quiero agradecer a mi mamá, papá y a mi hermano, por haberme apoyado en todo lo que he hecho en la universidad, por alentarme a cumplir mis propósitos y alcanzar mis metas, por insistirme en tener una carrera en lo que yo quisiera, y por proveer todo lo necesario para que yo haya logrado llegar hasta aquí.

A mi tía Sandra, a mi tío Luis, a mi abuelo Jorge, mi abuela Lupita, mi tía Gabriela, mis primas Ana y Tamara, que nunca me han dejado de recordar cuanto me quieren y que de la misma manera siempre han estado para mí sin necesidad de esperar algo a cambio, porque eso me da la seguridad y certeza de qué es tener una familia de verdad.

Llegar hasta aquí tampoco hubiera sido posible sin las personas que he llegado a conocer en la facultad y especialmente a los que han sido mis amigos desde los primeros dos semestres; Tavo, Laila, y Valeria, me han demostrado que con 3 buenos amigos es más que suficiente para poder salir adelante en cualquier situación.

A Germán Calva, mi profesor y director de tesis, quien me ha impulsado y presionado como nunca nadie lo había hecho, porque cree en mi potencial para lograr cosas que generen un impacto en la sociedad y ser un buen profesionista.

Y finalmente pero no menos importante, a Axel, porque me ha enseñado que uno tiene que ser fuerte frente a cualquier situación y por amarme y permitirme amarlo tanto como lo hago.

## I. RESUMEN

Se pretende demostrar el efecto que produce el cambio del régimen climático en los anillos de crecimiento. Se recopilaron datos registrados por el Observatorio de Tacubaya, de precipitaciones y temperaturas en la ciudad, que datan de 1876 a 2016 y se obtuvieron 44 núcleos de *Pinus patula* y *P. teocote*, muestreados en el Desierto de los Leones y Ajusco. La extracción, conservación y preparación dendrocronológica se desarrolló de acuerdo a lo descrito por Stokes & Smiley (1996), Fritts (1976) y Villanueva-Díaz (2009). El análisis estadístico de las cronologías se realizó con los métodos sugeridos por Gutiérrez (2009), Creus & Puigdefábregas (1976), Cook (1990) y Fritts (1976).

Las temperaturas mínimas de primavera, para el periodo 1876-1915, oscilan entre los 10°-12°C, y con respecto a las máximas de verano, 10.5°-12.6°C; en el periodo 1915-1975 resultaron ligeramente más cálidas, de 9.5°-12°C. Finalmente de 1976 a 2016 las mínimas de primavera oscilaron entre los 10.5°-14°C y en verano de 11°-14°C. Las precipitaciones, a finales del siglo XIX hasta 1950, tuvieron una estabilidad, sin embargo aumentaron, y en los últimos 36 años (1980-2016) se presentó una sequía de aproximadamente 20 años, y lluvias intensas de más de 200 mm en primavera y más de 100 mm en verano.

Los pinos en el Ajusco son más sensibles a la disponibilidad de agua en primavera y a las temperaturas máximas en verano, mientras que los del Desierto de los Leones son más sensibles a las temperaturas máximas tanto en primavera como en verano. Concluyendo que si hay Cambio Climático en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), y que este afecta el crecimiento de los pinos en los bosques de la región.

## II. INTRODUCCIÓN

Los árboles registran a través del tiempo aquellos acontecimientos climáticos que se relacionan directamente con sus procesos de crecimiento (Gutiérrez, 2009). El crecimiento arbóreo en los trópicos es fuertemente influenciado por el clima, sin embargo, los reportes de las respuestas del crecimiento al clima son muy inconsistentes, variando desde la localización geográfica, tipo de bosque y las especies arbóreas (Rahman, *et. al.*, 2018).

El cambio de uso de suelo llega a alterar a escala regional los patrones de precipitaciones y temperatura (Jáuregui-Ostos, 2004); en la segunda mitad del siglo XX, en la Ciudad de México hubo una conversión de la vegetación en las planicies y en el piemonte, por campos de agricultura o suelo urbano mediante la deforestación. Al reducir las fuentes de humedad en la ciudad la radiación solar llega y calienta el aire, provocando temperaturas más cálidas y clima sea más seco (Jáuregui-Ostos, 2004).

La precipitación en la Ciudad de México tiene cambios en sus patrones, decreciendo a finales del siglo XIX; de 1900 hasta 1934 hubo un aumento, pero desde principios de la década de los años 30 hasta 1951 hubo otro decremento y desde este punto en adelante ha ido aumentando (Wallén, 1955).

Son pocos los estudios que se han realizado en los bosques templados de Cuenca del Valle de México y que registren el efecto de los cambios de temperatura y precipitación sobre el crecimiento de las especies arbóreas que ahí habitan.

### III. ANTECEDENTES

En la presente tabla (1) se muestran los trabajos científicos que han demostrado relación entre el crecimiento arbóreo, los patrones de precipitaciones, temperaturas y la contaminación:

**Tabla 1.** Principales estudios.

AUTOR	APORTACIÓN
Creus & Puigdefábregas, 1976.	Determinaron la climatología histórica y realizaron la dendrocronología de <i>Pinus uncinata</i> Ramond en España, proponiendo un método estadístico de las mediciones de anillos y clima.
Fritts, 1976. Capítulo IV.	Estableció principios y métodos para la dendrocronología y la dendroclimatología.
Schweingruber, 1988. Capítulo III.	Describe las reacciones de los árboles a los factores climáticos en su crecimiento, explicando desde la formación de anillos y tamaño de las células y de la pared celular.
Innes & Cook, 1989.	Analizaron los anillos de crecimiento de árboles y encontraron la relación entre la contaminación y su ancho.
Cook & Kairiukstis, 1990. Capítulos II & III.	Describió los métodos para analizar anillos de crecimiento (dendrocronología) en específico estudios ambientales.
Bernal-Salazar & Terrazas, 2000.	Caracterizaron la variación radial de las dimensiones traqueídales e identificaron que las temperaturas máximas influyen negativamente sobre el crecimiento de <i>Abies religiosa</i> en la sierra El Campanario, Michoacán.
Jáuregui-Ostos, 2000.	Determinó los cambios del régimen climático en la Ciudad de México desde la llegada de los españoles hasta el año 2000, concluyó que la media anual de: temperatura oscila de 12 a 16°C, y de precipitación entre 700 y 1200 mm al año.
Miina, 2000.	Determinó que las temperaturas de verano tienen una correlación positiva con la madera tardía y que la precipitación tiene correlación positiva con la madera temprana de <i>Pinus sylvestris</i> en Finlandia.
Biondi, 2001.	Realizó la dendrocronología de <i>Pinus hartwegii</i> , en el Nevado de Colima, determinando que las precipitaciones de verano son la señal dendroclimática más fuerte.
González-Elizondo, et al., 2005.	Con las cronologías de <i>Pseudotsuga menziesii</i> de la Sierra Madre Occidental en México, se determinó que la precipitación estacional influye en su crecimiento.
Martínez-López, et al., 2018.	Describe tendencias no lineales y las oscilaciones no estacionarias de la precipitación anual acumulada en la Ciudad de México.
Rahman, et al., 2018.	Determinó los cambios en la sensibilidad de los anillos de crecimiento al clima en árboles de bosque húmedo tropical en Bangladesh.

#### IV. MARCO TEÓRICO

##### **Clima en el Centro de México.**

Vidal-Zepeda (2005) describe que entre alturas de 2000 y 2800 metros sobre nivel del mar (msnm), sobre la meseta de Anáhuac el clima es templado, con una temperatura media anual de 12 a 18°C (Fig. 1); es la zona más poblada del país, dentro de la cual se encuentran las ciudades de Morelia, Toluca y Ciudad de México (anteriormente D.F.).

A mayor altitud, entre 2800 y 4000 msnm, las temperaturas anuales disminuyen a valores menores de 12°C, lo que clasifica a estos climas como semifríos, y se observa en las laderas de las sierras Nevada, de las Cruces, del Ajusco, de Angangueo, del Nevado de Toluca, de la Malinche y varias eminencias aisladas del Eje Neovolcánico.

Entre los meses de Abril a Septiembre, se presenta la temporada caliente, donde las temperaturas no son menores a 18°C, más que en lugares con altitud superior a los 2100 msnm, sin embargo la temperatura puede disminuir en los meses más lluviosos que son Julio, Agosto y Septiembre.

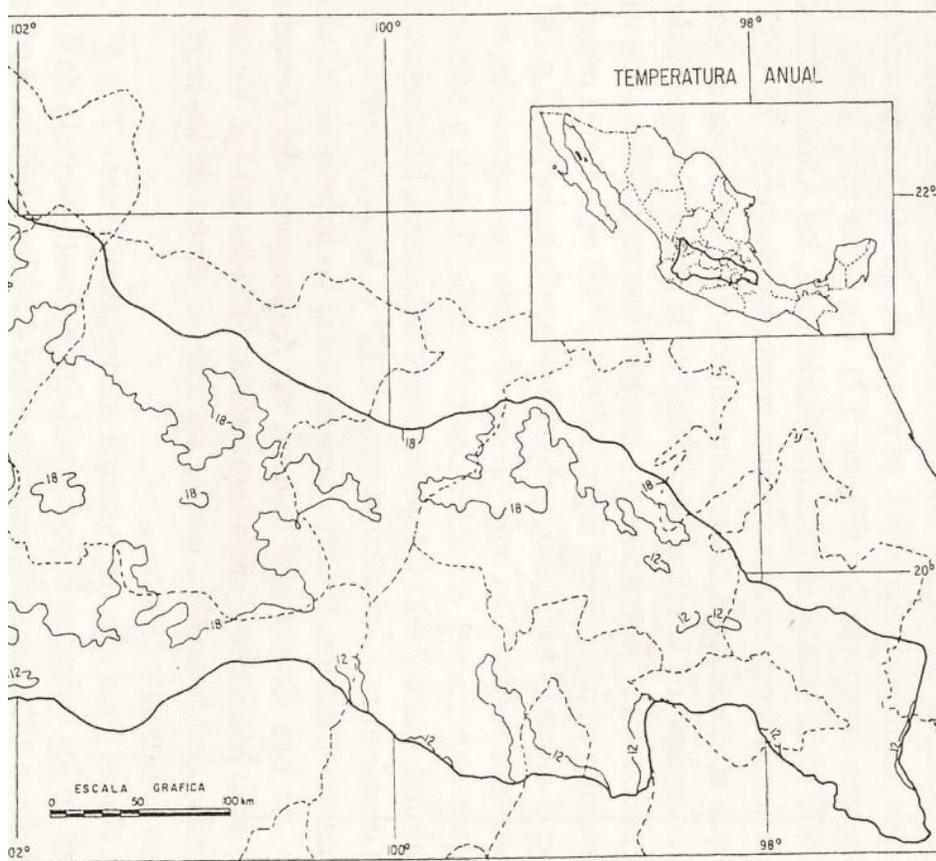


Figura 1. Temperatura Media Anual en la región Centro de la República Mexicana. Tomada de Vidal-Zepeda (2005).

De acuerdo con Vidal-Zepeda (2005), predominan precipitaciones de 800 a 1000 mm anuales en el fondo de las cuencas del Eje Neovolcánico, pero la lluvia aumenta hacia el sur cuando la altitud es mayor como en las sierras Nevada, de las Cruces y Ajusco que reciben más de 1200 mm anuales (Fig. 2).

Las partes bajas reciben menores precipitaciones (menor a 4 mm) en la temporada seca, y en específico los meses de Febrero y Marzo que son los más secos, pero en abril se intensifican por la cantidad de humedad que cargan los vientos alisios.

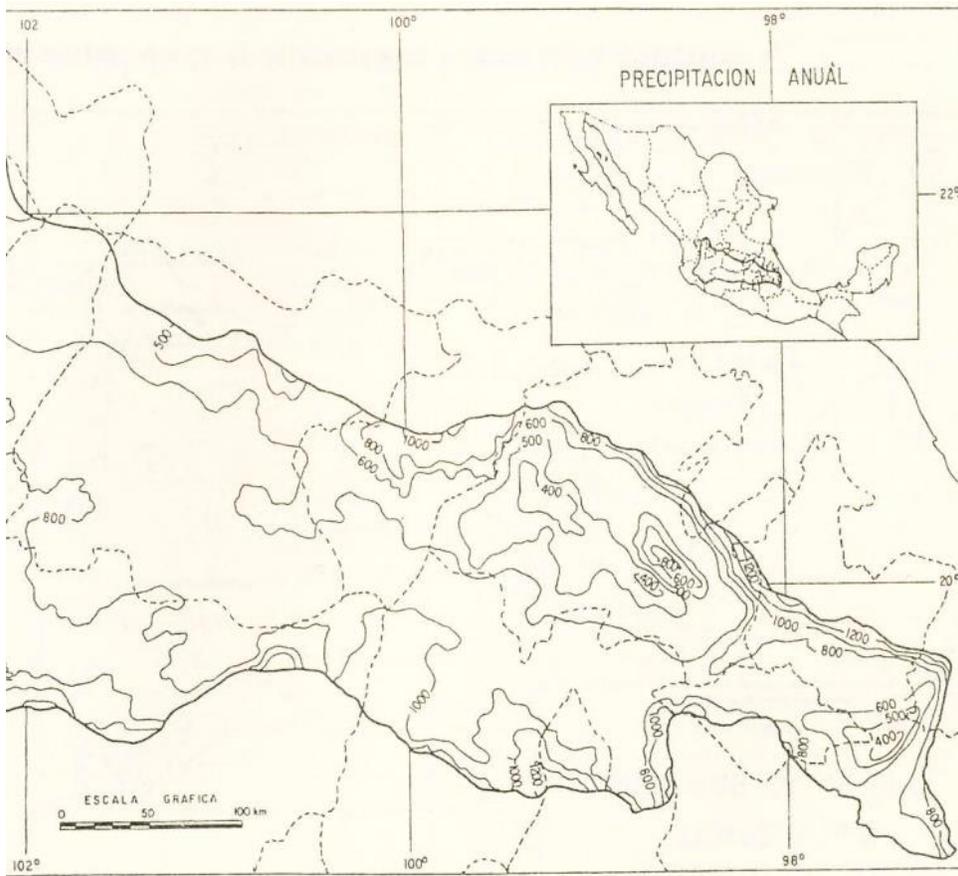


Figura 2. Precipitación Media Anual en la región Centro de la República Mexicana. Tomada de Vidal-Zepeda (2005).

### 🌍 Clima de la Ciudad De México.

De acuerdo con la clasificación climática universal de Köppen (Jáuregui-Ostos, 1995; 2000), la cuenca del Valle de México, tiene clima templado (Cw) en la porción centro y sur, y seco (Bs) (Fig. 3) en la parte norte y oriente donde la lluvia anual varía entre 400 y 550 mm, y la temperatura oscila entre 15 y 17°C. En la parte montañosa de la cuenca (oeste, sur y sureste) se acentúan las lluvias, cayendo entre 700 y 1200 mm anuales.

Jáuregui-Ostos (2000), explica que el clima en la ciudad es tropical de montaña atemperado por la altitud a la que se encuentra. Las masas de aire de origen polar que barren la cuenca en la época seca (Noviembre-Abril) abaten aún

más las temperaturas (sin llegar a 0°C). Al final de la temporada de secas, las temperaturas aumentan y antes del año 2000, rara vez pasaban los 30°C

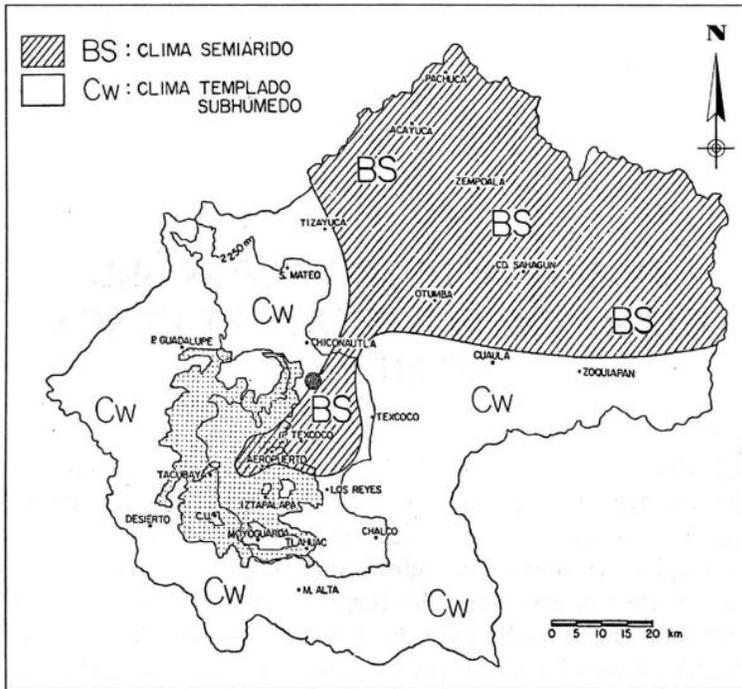


Figura 3. Climas de la Cuenca de México de acuerdo a la clasificación climatológica de Köppen, con datos del Servicio Meteorológico Nacional. Tomada de Jáuregui-Ostos, 2000.

En la época de secas (Noviembre-Abril), predominan los vientos secos del oeste, que levantan nubes de polvo, y durante el resto del año los vientos alisios húmedos que acarrear las lluvias a la cuenca. Estos vientos regionales interactúan con los locales llamados de valle, que son los que se dirigen hacia el perímetro del valle por acción de los diferenciales térmicos en la cuenca, y de montaña, que son lo opuesto a los de valle, y el aire frío baja por efecto de gravedad

De acuerdo con Gutiérrez de MacGregor (1995), el proceso acelerado de urbanización que se ha observado en la capital, se debe principalmente al cambio de inversión hacia el sector industrial, lo que provocó una fuerte inmigración del campo hacia la ciudad, que dio como resultado un crecimiento anual del 5.5 por 100, cuando antes era de 2.7 por 100.

Hay un aumento en la frecuencia de lluvias intensas, provocando inundaciones devastadoras en verano y de temperaturas elevadas, ya que a principios del siglo XX la temperatura media anual era de 14.5°C y a finales del siglo era un poco más de 16°, y si el clima es más caliente en la ciudad se creará un ambiente urbano con mayor producción de oxidantes y de ozono (Jáuregui-Ostos, 1995; Gutiérrez de MacGregor, 1995).

En cuanto a la mayor frecuencia de los aguaceros (mayores a 20 mm/h), estos fenómenos ocurrían en razón de cuatro eventos en la década de los cuarenta, y para la década de los ochenta se quintuplicaron (Jáuregui-Ostos, 2000). En la línea del tiempo (Fig. 4) se aprecia un resumen de los cambios de temperatura y lluvias que hubo desde 1876 hasta 2016.

### **El Niño y La Niña**

Estos dos fenómenos del Niño y la Niña, influyen a escala continental y hasta local provocando eventos naturales de variabilidad climática (sequía o aumento de lluvias y temperaturas del mar), ya que estos fenómenos se presentan en promedio de 3 a 5 años, y según los registros históricos, de 2 a 7 años, y pueden tener una duración entre 9 y 12 meses.

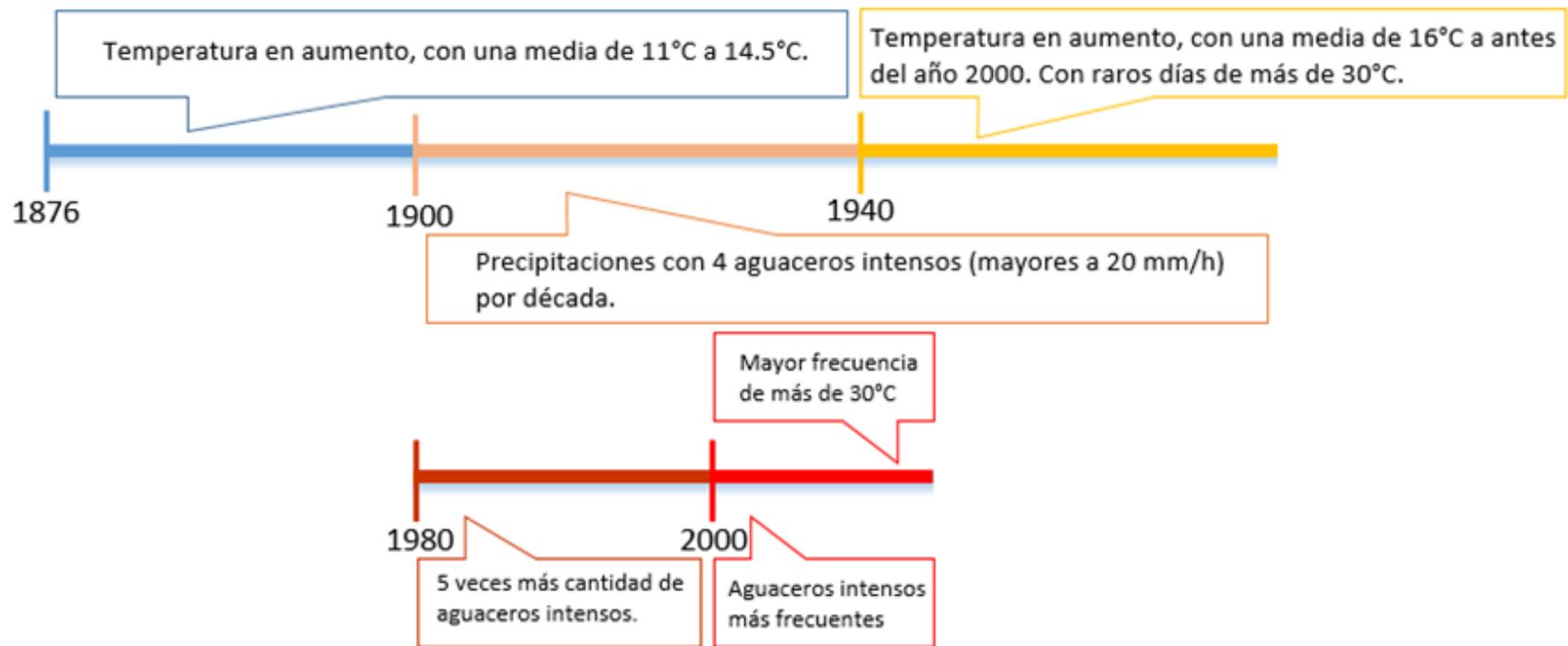


Figura 4. Línea de tiempo de cambios en los patrones de temperatura y precipitación desde 1876 hasta 2016. (Elaborado por el autor).

El Niño se caracteriza por ser un evento climático relacionado con el calentamiento de las aguas del mar en el Pacífico y la fase de enfriamiento recibe el nombre del fenómeno de La Niña. Poveda y Mesa (1996) dataron los eventos ocurridos en el siglo XX hasta 1992, los cuales son:

El niño: 1902, 1904, 1911, 1913, 1918, 1923, 1925, 1930, 1932, 1939, 1950/51, 1953, 1957/58, 1963. 1965, 1969, 1972/73, 1976/77, 1982/83, 1986/87, y 1991/92; y el Ministerio del Ambiente del Gobierno de Perú, dató el evento extremo de 1997/98. Y en lo que va del siglo XXI, de acuerdo al índice ONI (Oceanic Niño Index) de la NOAA, se han presentado cuatro episodios El Niño en el Pacífico central: dos de intensidad débil en los años 2004/05 y 2006/07, y dos de intensidad moderada en los años 2002/03 y 2009/10 (SENAMHI, 2014).

#### **Crecimiento Estacional de las Coníferas.**

La mayor parte de las coníferas y algunas especies frondosas desarrollan un tallo simple y no dividido, produciendo una corona que toma una forma triangular, denominada excurrente. El incremento del volumen del tronco depende del crecimiento en altura, en diámetro, y del grado de conicidad. El crecimiento en altura se produce a medida que las yemas apicales se expanden y crecen cada primavera, y las yemas laterales son las indicadores para el crecimiento en verano (Hocker, 1984).

El crecimiento radial se puede atribuir al incremento en la masa celular alrededor del meristema lateral (cambium) (Fig. 5), el cual produce cada año las células xilemáticas hacia el interior del tallo y las células floemáticas hacia el exterior (Hocker, 1984). Los meristemas primarios se encargan del crecimiento en altura y los secundarios en crecimiento de grosor (Gutiérrez, 2009).

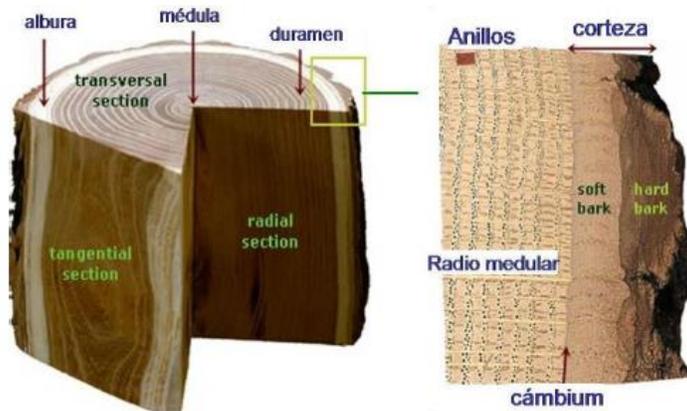


Figura 5. Estructura de la madera de un tronco de roble en cortes: transversal, radial y tangencial (Gutiérrez, 2009).

De acuerdo con Hocker (1984), las etapas de desarrollo son: Semillero (0-4.5' de altura), Juvenil o brinzal (0.6-4.0" diámetro a altura de pecho), Poste (4.0-10.0" dap), Joven (10-24" dap), Maduro (24" dap) y Extramaduro (cuando la corona superior muestra ramas muertas).

En las primeras etapas de desarrollo el crecimiento del árbol aumenta en altura; y esto predomina hasta la última etapa de poste cuando crece en diámetro. El patrón del crecimiento en altura de las diferentes especies varía durante una estación de crecimiento (Fig. 6), esto permite la producción de células de madera durante el verano en el tallo y de las raíces para el crecimiento de madera de primavera que se presenta en la primera parte de esta (Hocker, 1984).



Figura 6. Variación estacional en la formación de madera de primavera, madera de otoño a diferentes alturas en el tallo del pino rojo (Larson, 1969 en Hocker, 1984).

El crecimiento radial anual comienza en la primavera y termina en el verano o en el inicio del otoño (Hocker, 1984). La síntesis de carbohidratos reservados por el año anterior al crecimiento en curso permite el desarrollo de hojas y la producción xilema y floema (Fig. 7).

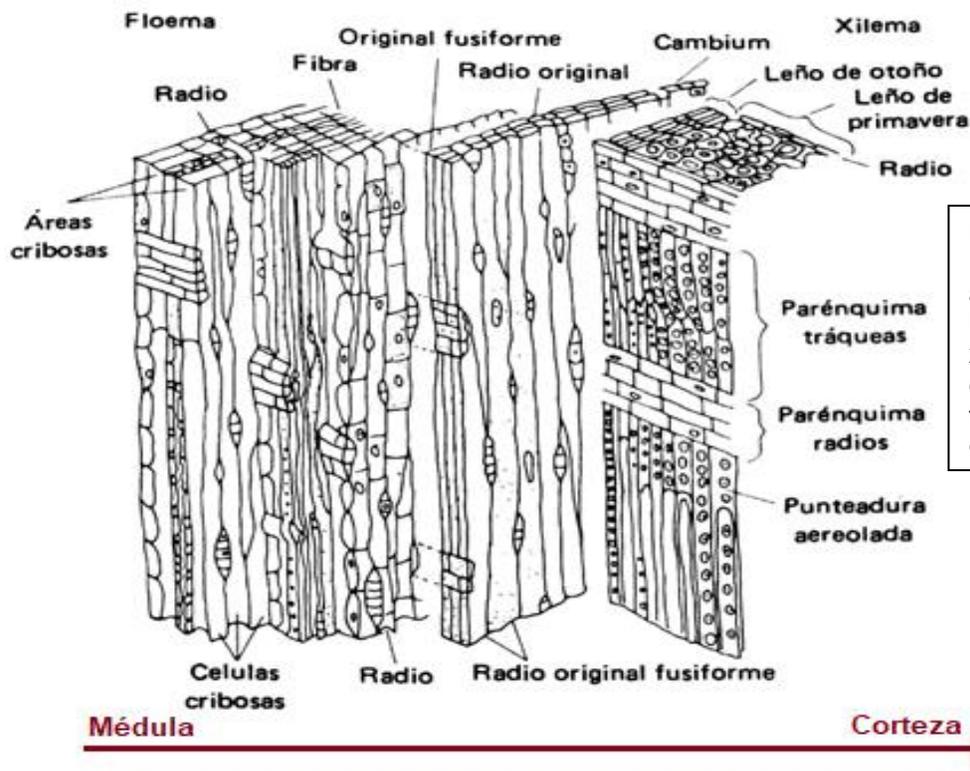


Figura 7. Distribución anatómica de las células del xilema, cambium y floema para coníferas

Las hojas formadas en el año en curso han alcanzado su desarrollo total, son capaces de producir suficientes carbohidratos de tal forma que el cambium, el xilema y el floema continúan desarrollándose. Esto permite el desarrollo de células de madera durante el verano en el tallo y raíces en contraste con el crecimiento de madera de primavera (Hocker, 1984).

#### ❖ **Formación de los anillos.**

En las regiones templadas y tropicales, casi todos los vegetales leñosos forman cada año una capa de madera bien definida y de forma concéntrica a las capas formadas en años anteriores, denominada anillo de crecimiento (Creus & Puigdefábregas, 1976).

El crecimiento de los árboles y de las plantas leñosas en general se debe a la actividad de los meristemas primarios y secundarios, que son tejidos formados por células no diferenciadas capaces de dividirse y generar nuevas células (Gutiérrez, 2009).

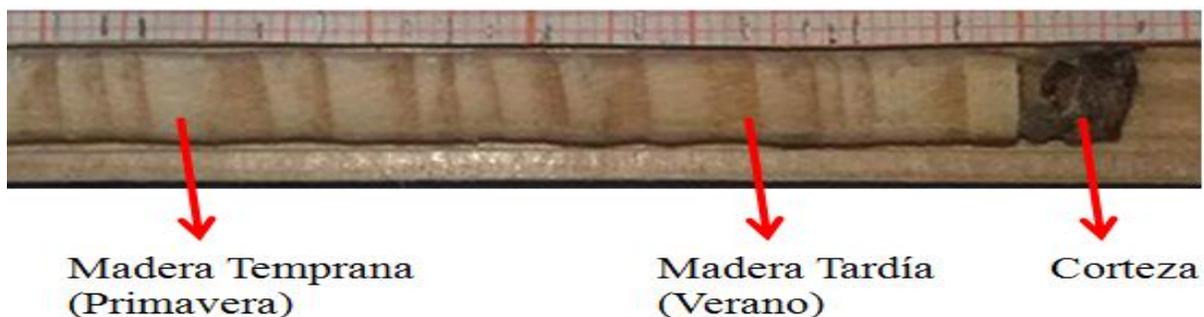


Figura 8. Núcleo extraído de pino, donde se observa las diferencias de temporada (primavera y verano) en los anillos de crecimiento. (Autor).

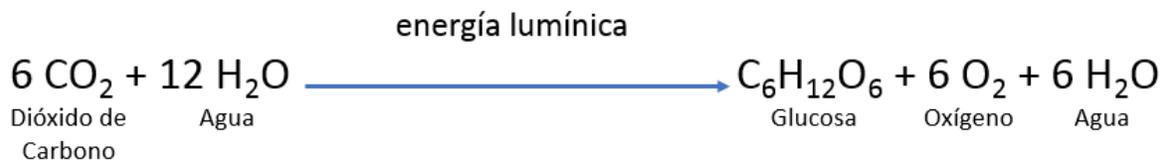
La producción de células nuevas en el xilema (madera) es rápida al principio de la primavera y se enlentece a medida que avanza el verano (Fig. 8), y finalmente se enlentece cuando las temperaturas vuelven a ser bajas (Gutiérrez, 2009), debido a este crecimiento marcado en primavera y verano se distinguen en

madera temprana y madera tardía. También para el crecimiento de los árboles influyen procesos como la *fotosíntesis* y la *respiración*.

### **Fotosíntesis & Respiración.**

La *fotosíntesis* es el proceso por el cual se crea azúcar (glucosa) a partir de dióxido de carbono y agua en presencia de luz, dando también como producto oxígeno.

La ecuación general de la fotosíntesis es la siguiente:



Es un proceso de suma importancia para las plantas porque la glucosa, o fragmentos químicamente alterados de esta, forman los bloques de los cuales están hechas las demás sustancias orgánicas. La fotosíntesis se puede resumir en los siguientes eventos secuenciales (Pallardy, 2008):

1. Captura de la energía lumínica en los cloroplastos.
2. Separación de la molécula del agua, liberando electrones y O<sub>2</sub>.
3. Transferencia de electrones llevando a la generación de energía química como ATP y reduciendo energía como NADPH<sub>2</sub>.
4. Y pasos terminales que implican gasto de energía de ATP y el poder reductor del NADPH<sub>2</sub> para fijar moléculas de CO<sub>2</sub> en ácido fosfoglicérico (PGA) y reducirlo a fosfogliceraldehído, y finalmente convertir este compuesto en carbohidratos más complejos como la glucosa.

La glucosa posteriormente formará otras sustancias que son los *carbohidratos*, *grasas* y *proteínas* que son necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

### ✚ **Carbohidratos, Grasas & Proteínas.**

Los *carbohidratos* que se usan para nutrir a la planta son los azúcares y almidones, que resultan en componentes de la célula como celulosa y la lignina, pero estos dos componentes ya no pueden ser reutilizados como nutrientes o como fuente de energía (Fritts, 1976). La celulosa es el principal contribuyente de las propiedades de resistencia en las fibras de madera con su estructura cristalina, cuando se produce, también se sintetizan la hemicelulosa y la lignina teniendo roles importantes en las propiedades transversas de las fibras (Fig. 9) (Salmén, 2004).

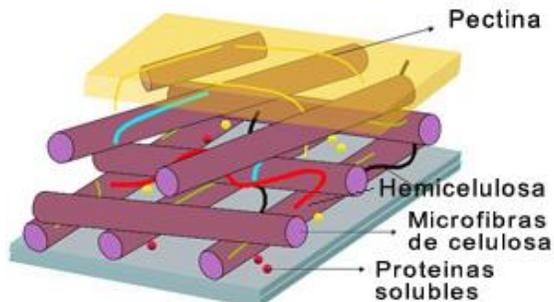


Figura 9. Estructura interna de la madera. Obtenida de: [http://www.carpinteroemadrid.com/como\\_es\\_la\\_madera\\_por\\_dentro.html](http://www.carpinteroemadrid.com/como_es_la_madera_por_dentro.html)

Las *grasas* y sus derivados son importantes constituyentes del protoplasma y pueden acumularse en grandes cantidades o pueden formar las ceras, como cutina o suberina, las cuales son depositadas comúnmente en la pared celular de la endodermis, epidermis y el corcho. Las *proteínas* son importantes dentro del protoplasma y en algunos casos sirven como nutrientes almacenados, como en las semillas (Fritts, 1976; Pallardy, 2008).

## **Asimilación.**

La asimilación se considera como la utilización de carbohidratos, grasas y proteínas para sintetizar el protoplasma, paredes celulares, y muchas otras sustancias que componen los sistemas enzimáticos, pigmentos y estructuras de las plantas. El producto final de la asimilación es un constituyente funcional de una célula (Fritts, 1976).

Todas las partes de un anillo de crecimiento son esencialmente producidas por la asimilación, la cual puede ser dependiente de cualquier factor que limite la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de nutrientes, y el nivel general de metabolismo de la planta (Fritts, 1976).

Gutiérrez (2009), publicó que para las coníferas o gimnospermas, la madera temprana es más clara y está formada por células llamadas traqueídas, que son grandes y poseen pared celular pequeña; por el contrario, la madera tardía es más oscura y posee células más pequeñas con pared celular más gruesa. Estas diferencias hacen posible la identificación y la datación precisa de los anillos.

## **Dendrocronología.**

La edad aproximada de un árbol se puede establecer contando los anillos de crecimiento que se observan en la parte interna del tronco, y se pueden comparar patrones de anillos anchos o delgados con los de otros árboles para establecer el año exacto en el que se formaron esos anillos (Fritts, 1976).

El análisis de los anillos de crecimiento incluye la medición del crecimiento radial anual del árbol. Según Innes & Cook (1989), el procedimiento que más se ha usado es coleccionar uno o más núcleos de los árboles del rodal seleccionado, tomados cerca o a la altura del pecho, y medir el crecimiento anual.

La dendrocronología es una rama de la ciencia que permite datar los anillos de crecimiento de los árboles, dado que el nombre indica una relación entre tiempo y árbol. Proviene del griego *dendron* -árbol-, *crono* -tiempo- y *logo* -conocimiento-, y es una disciplina que conjunta principios, técnicas y métodos que permiten establecer la relación entre el tiempo y los anillos de crecimiento anuales, también permite extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009).

Los anchos de los anillos son útiles para la datación ya que el crecimiento arbóreo usualmente es afectado por variaciones del clima, y sus secuencias anuales favorables o desfavorables (Fritts, 1976). El crecimiento también se ve afectado por otros eventos como la contaminación atmosférica, plagas e incendios, de los cuales se puede identificar el año en el que sucedieron encontrando patrones iguales (Fig. 10) en los anillos de distintos árboles.

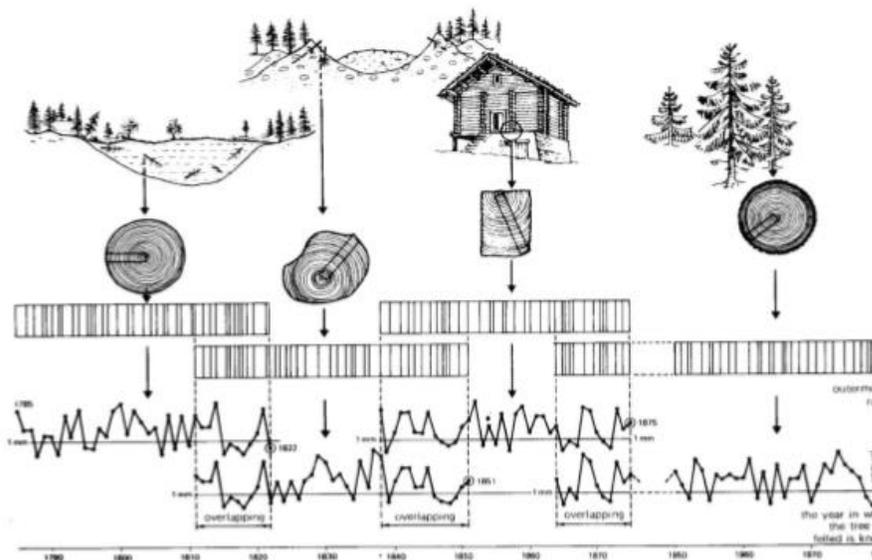


Figura 10. Demostración grafica de la datación mediante los diferentes patrones encontrados en los anchos de los anillos de crecimiento de árboles, casas y troncos tirados (Gutiérrez, 2009).

Mediante la técnica de fechar eventos naturales históricos en los anillos, se puede obtener información climatológica que puede ser analizada para entender como era el clima del pasado y posiblemente como será en el futuro.

La ciencia que se encarga de reconstruir el clima del pasado usando los anillos de los árboles es la *dendroclimatología* (Fritts, 1976).

### **Dendroclimatología.**

Fritts en 1976 publicó que las condiciones que preceden a la temporada de crecimiento a veces tienen una mayor influencia en el ancho del anillo que las condiciones durante la temporada de crecimiento, y los efectos relativos de esos factores en el crecimiento varían con la latitud, la altitud y las diferencias en los factores del sitio. Los efectos de algunos factores climáticos sobre el crecimiento son insignificantes durante ciertas épocas del año, pero importantes en otras ocasiones.

Los factores climáticos a veces están directamente relacionados con el crecimiento y otras veces están inversamente relacionados con el crecimiento. Se describen métodos estadísticos para determinar estas diferencias en la respuesta climática de árboles de diferentes sitios.

La dendroclimatología usa la información fechada en los anillos de crecimientos, sobre climas del pasado y del presente (Fritts, 1971). Esta disciplina implementa tratamientos estadísticos cuyo objetivo es obtener la señal climática de los datos, eliminando otros factores que influyen sobre los árboles (Manrique-Menendez & Fernández-Cancio, 1995).

Los datos con previo tratamiento estadístico se comparan con registros meteorológicos y después, los estimados del clima resultantes pueden servir para

completarlos y proveer información para periodos y áreas que no la tengan (Fritts, 1976).

***Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & *Pinus patula* Schl. et Cham.**

De acuerdo con la ficha biológica, creada por CONAFOR, *Pinus teocote* o pino colorado (Fig. 11), es un árbol mediano perennifolio nativo de México, con

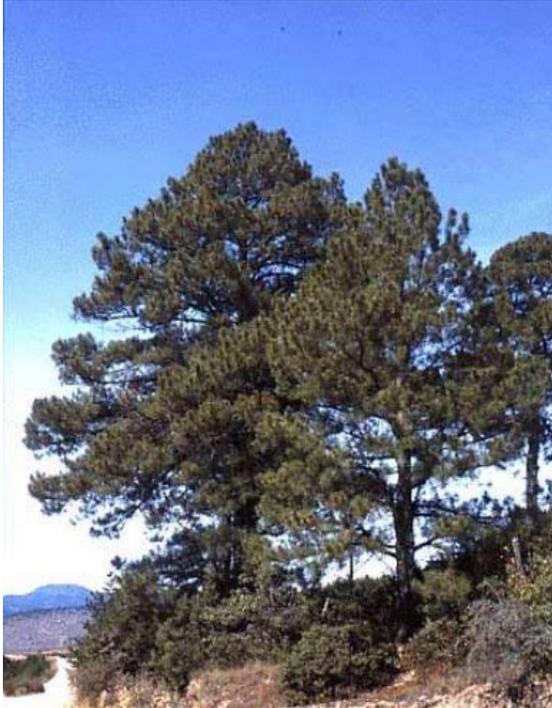


Figura 11. *Pinus teocote*. Tomada de la ficha de descripción de la especie de CONAFOR.

8.25 m de altura promedio, con una copa redondeada cuando son maduros, y una copa piramidal cuando son jóvenes.

Tiene una amplia distribución en el país, extendiéndose a lo largo de la Sierra Madre Occidental hasta Chiapas. No está reportada la especie para el parque del Ajusco ni para el Desierto de los Leones, pero se identificó *in situ*. Se puede encontrar a una altura mínima de 1500 metros sobre el nivel del mar (msnm), y una máxima de 3100 msnm.

Requiere de un rango de temperaturas de -14° a 38°C, y un rango de precipitación de 600 a 1500 mm. Su reproducción es mediante semillas y florece en Febrero, mientras que los conos los desarrolla durante los meses de invierno y son dehiscentes.

*Pinus patula* o también llamado pino llorón (Fig. 12), es un árbol perenne de 30 a 35 m de altura y de 50 a 90 cm de diámetro normal. Su copa es abierta y redondeada, de tronco recto y con un fuste de hasta 20 m de altura. Se desarrolla

principalmente en zonas templadas con exposiciones norte y aquellas que reciben una gran cantidad de niebla durante el año.

Se distribuye naturalmente sobre la sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre de Oaxaca, y se puede encontrar en un rango de altura de 1600 a 3100 msnm. Requiere de un rango de temperaturas de  $-14^{\circ}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ , y precipitación de 1000 a 2500 mm. Su reproducción es por semilla y florece entre enero y abril y su polinización es anemófila, y los conos son serótimos y su maduración es hasta el final de la floración.



Figura 12. *Pinus patula*. Tomada de la ficha de descripción de la especie de CONAFOR.

## **V. PROBLEMA**

Estudios realizados por Jáuregui-Ostos (1995, 2000 & 2004), SEDEMA (2016) y Martínez-López (2018), coinciden en referir que hubo un incremento de 4°C de la temperatura media en las últimas décadas, con una media que oscila entre 12°C en la zona sur de la Ciudad de México y 16°C en la zona centro.

Las precipitaciones han aumentado con el paso de los años, de 600 mm a 900 mm de precipitación media anual en la zona centro, y de hasta 1200 mm en la zona sur, y la frecuencia de aguaceros intensos (mayores a 20 mm/h), en relación a que ocurrían a razón de cuatro eventos en la década de los cuarenta, y en los años ochenta se quintuplicaron.

Fritts (1976) reportó que los pinos son sensibles a los patrones de temperatura y precipitación, por lo que se derivan las siguientes preguntas:

***¿Los cambios en los patrones de temperatura y precipitación locales y regionales, expresan el fenómeno del Cambio Climático en la ZMVM?***

***¿El Cambio Climático se verá reflejado en la madera temprana y tardía de los anillos de crecimiento de los pinos en el Desierto de los Leones y el Ajusco?***

## VI. HIPÓTESIS

Si los cambios de patrones de temperatura y precipitación expresan el fenómeno del Cambio Climático en la Zona Metropolitana del Valle de México, y los pinos son sensibles a las variaciones del clima; entonces se expresarán los cambios en los anillos de crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus teocote*.

## VII. OBJETIVOS

### - General

- Determinar el efecto del cambio de temperatura y precipitación, en los anchos de los anillos de crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en los parques nacionales Desierto de los Leones y Ajusco, para identificar la influencia del cambio climático en el crecimiento arbóreo.

### - Particulares

- Obtener el cambio en el régimen del clima en la Cuenca del Valle de México para identificar ciclos o patrones.
- Determinar las cronologías de los núcleos de pino en las temporadas de crecimiento arbóreo (primavera y verano), para obtener sus patrones de crecimiento.
- Correlacionar los anchos de crecimiento en primavera y verano de los pinos con los datos de temperatura y precipitación, para saber la influencia de estos factores climáticos sobre el crecimiento.

## VIII. MÉTODO

### 📍 Áreas de muestreo.

**Tabla 2. Descripción de las áreas de estudio.**

Parque Nacional Cumbres del Ajusco	Parque Nacional Desierto de los Leones
19° 12' y 19° 12' 50" N	19° 15' 20" y 19° 19' 40" N
99° 14' 35" y 99° 16' 20" W	99° 17' 40" y 99° 19' 40" W
920 hectáreas, hasta 3900 m.s.n.m.	1866 hectáreas, hasta 3790 m.s.n.m.
<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. hartwegii</i> con zacatonal <i>Muhlenbergia quadridentada</i> , zacatonal <i>Calmagrostis tolucensis</i> y <i>Festuca amplissima</i> (Vargas-Máquez, 1997).	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus ayacahuite</i> , <i>P. hartwegii</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> y <i>P. radiata</i> en asociación con <i>Cupressus lindleyi</i> , <i>C. benthamii</i> , <i>Salix</i> spp., <i>Alnus</i> spp., y <i>Quercus</i> spp. (Calva-Vázquez, et. al., 2006).

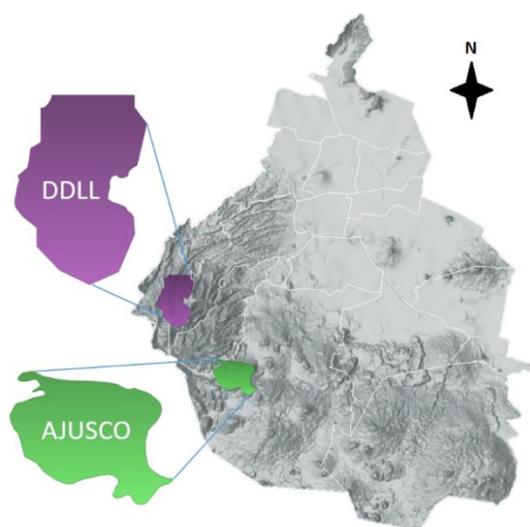


Figura 13. Mapa de la ubicación de los parques Nacionales Desierto de los Leones (DDLL) y Ajusco. (Autor).

### ✚ Fase de Campo.

Para ambos parques (Fig.13) , las muestras de pino se recolectaron en septiembre 2017 y en marzo 2018, se eligió un rodal en cada parque, con pendiente menor a 3° (Fig. 14), y la elección de los árboles se realizó por el método del vecino más cercano, verificando que no presente daños por humanos, bifurcaciones, ni plagas para evitar encontrar anillos falsos; se escogieron árboles con una circunferencia mayor a 1.60 m a la altura del pecho (1.30 m), para eliminar el factor de rápido crecimiento de los 10 primeros años de vida de los árboles.



Figura 14. Rodal elegido para recolectar las muestras de pino en el parque Cumbres del Ajusco. Foto tomada por M. en C. Germán Calva Vásquez, en Septiembre 2017.

A cada árbol se le registraron los datos dasométricos y se extrajeron dos núcleos por árbol con un taladro Pressler de 15" (Fig. 15) de manera perpendicular a la pendiente, y las virutas se etiquetaron y guardaron en popotes para el transporte a laboratorio (Stokes & Smiley, 1996; Villanueva-Díaz *et. al.*, 2009).



Figura 15. Extracción de los núcleos de los pinos con el taladro Pressler. Foto tomada por M. en C. Germán Calva Vásquez, en Septiembre 2017.

#### **Fase de Laboratorio.**

En laboratorio se secaron las muestras en la estufa a 45° C por 48 horas, después se pegaron en bastidores de madera, orientando las virutas con el núcleo visible, se amarraron (Fig. 16) para fijar la muestra mientras seca el pegamento. Posteriormente, se lijaron las virutas hasta que los anillos de crecimiento se vieran claramente a simple vista y bajo el estereoscopio para realizar el prefechado con un papel milimétrico (Fig. 17) pegado a un costado del bastidor e identificar anillos falsos (Stokes & Smiley, 1996; Villanueva-Díaz *et. al.*, 2009).



Figura 16. Montado de núcleos en bastidores de madera. Foto tomada por el autor, en Octubre 2017.

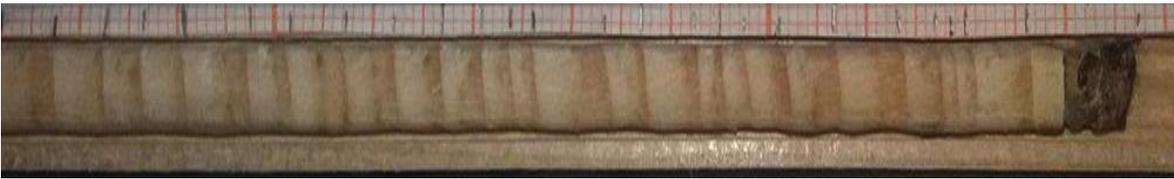
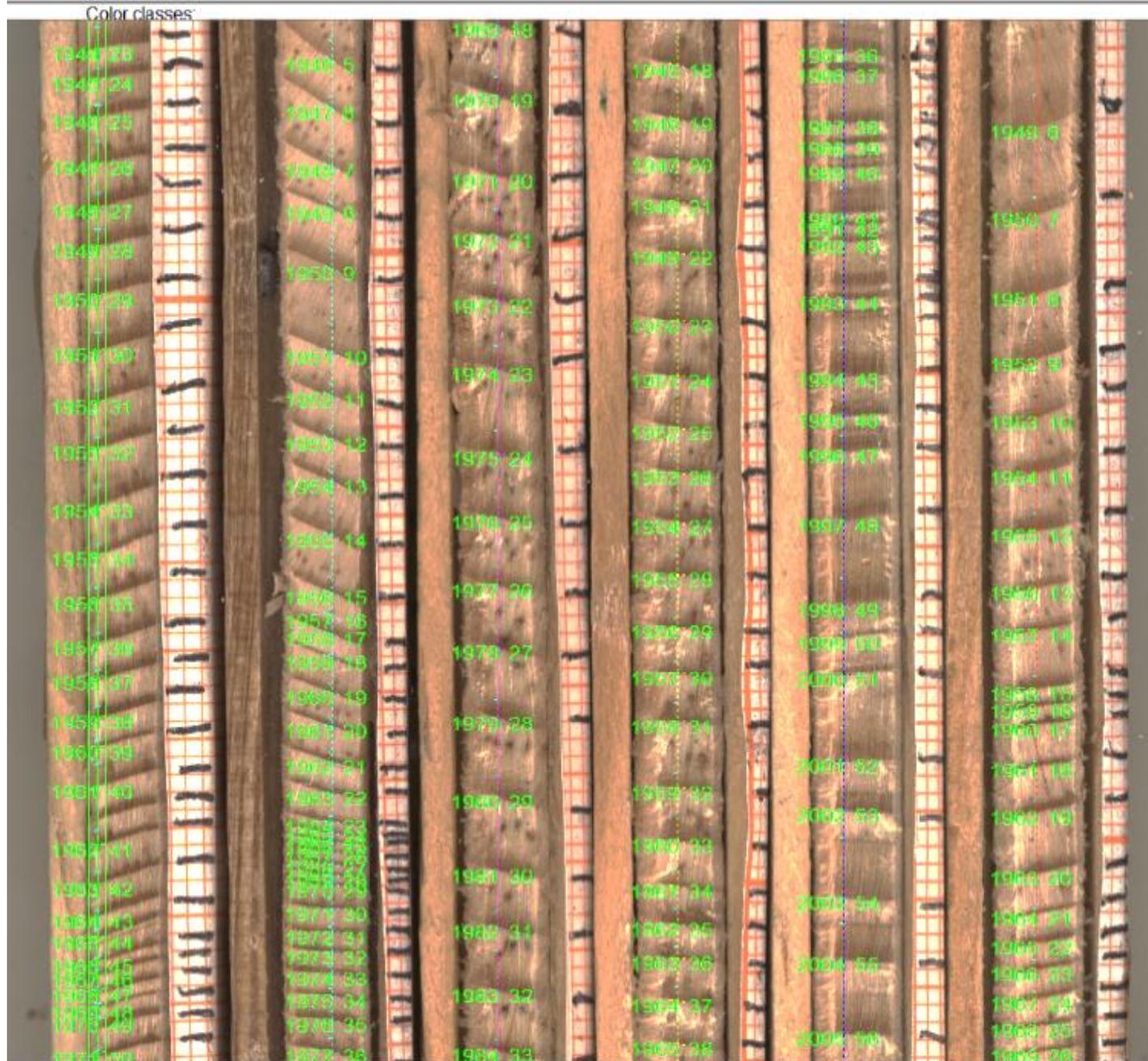


Figura 17. Lijado de madera donde se visualizan los anillos de crecimiento con nitidez y marcaje de anillos con papel milimétrico. Foto tomada por el autor, en Octubre 2017.

Se escanearon las muestras para ser procesadas en el programa WinDENDRO® (Fig. 18) a una resolución de 1200 pixeles para poder marcar los anillos de crecimiento por año con mayor eficiencia y medir el grosor de la madera temprana (crecimiento de primavera), madera tardía (crecimiento en verano) y el ancho total de cada anillo.

#### Fase de Gabinete.

Se solicitaron los registros de datos de precipitaciones y temperaturas de todas las estaciones meteorológicas de la Ciudad de México en el Observatorio de Tacubaya que pertenece a CONAGUA. Se seleccionaron en la computadora y se ordenaron los datos de la estación meteorológica de Tacubaya, porque es la que tiene los datos de mayor antigüedad (desde 1877 hasta el 2016).



El software se programó para que se tuvieran salidas numéricas y se obtuvo una base de datos en el programa Excel, en el cual se realizó crossdating y se realizó la estandarización de los datos para poder obtener las cronologías de las ganancias totales de los anchos de los anillos y eliminar el efecto radial del crecimiento. Estos procedimientos estadísticos se desarrollaron con las formulas propuestas por Creus y Puigdefábregas (1976), para transformar los datos a índices y eliminar la tendencia de la edad y otros factores que generan ruido en la lectura de los datos brutos, y posteriormente para calcular los índices de sensibilidad media.

Posteriormente, en el software Statgraphics Centurion XV se relacionaron con los promedios de temperaturas máximas y mínimas por temporada de crecimiento arbóreo (primavera, siendo marzo, abril, mayo y junio, y verano siendo julio, agosto y septiembre.), se realizó lo mismo con los datos de precipitación total al mes con las mismas temporadas (primavera y verano).

Se correlacionaron con un análisis de regresión múltiple los datos de temperatura y precipitación con las cronologías de los anchos de los anillos de crecimiento y las ganancias por temporada de primavera y verano. Y finalmente se ejecutó un análisis de Cluster a las variables para encontrar la similitud entre ellas.

**HASTA FIGURAS ARREGLADAS**

## **IX. RESULTADOS**

### **9.1 Cronologías del Ajusco y Desierto de los Leones.**

En la cronología de 100 años del parque Ajusco (Fig. ) se determinaron 7 etapas de crecimiento que describe el total de 22 pinos muestreados en este parque. Las primeras cinco etapas van decreciendo en su comportamiento, de 5.9 mm a 1.8 mm, de la etapa 5 a la 6 aumenta hasta 2.5 mm y de la etapa 6 a 7 aumentó hasta 3.2 mm.

En la cronología de 106 años del parque Desierto de los Leones (Fig. ), se determinaron 12 etapas de crecimiento que describe el comportamiento del ancho de los anillos de crecimiento de los 22 pinos muestreados en el parque. En las primeras 3 etapas hay una reducción de 12 mm a 6 mm, de la etapa 4 a 6 se redujo el ancho de 6 a 4 mm.

El comportamiento en la secuencia del ancho de los anillos de crecimiento de la madera tardía varía en las regiones de alta precipitación; en la zona en la que se ubican los parques Desierto de los Leones y Ajusco la precipitación media anual es de 1200 mm aproximadamente. El poco crecimiento entre las etapas 5 y 6 de la figura y las etapas 10 y 11 en la figura , se puede explicar porque, como menciona Schweingruber (2007), el crecimiento de los anillos se ve limitado por sequías largas o frío extremo.

El crecimiento de los pinos en el Ajusco (Fig. ) varía más en primavera (línea verde) que en verano (línea morada), dado que en primavera los anchos de los anillos van desde casi 6 mm hasta tamaños menores a 2 mm. En cuanto a verano, los anchos de los anillos van desde casi 2.1 mm hasta menos de 1 mm en las últimas décadas.

Con los pinos del Desierto de los Leones (Fig. ) ocurre lo mismo que en los del Ajusco. Los anchos de los anillos en primavera varían más que en verano, ya que en primavera los anchos van de casi 1.2 cm hasta de 2 mm en las últimas décadas, y en el verano van de 3 mm a menos de 1 mm.

Pero en ambos parques y en ambos periodos de crecimiento, los años en los que los pinos crecieron menos fueron desde 1980 a 1995.

Las líneas de tendencia polinomiales representadas en ambas figuras, demuestran que no hay una competencia por espacio ni luz. Los coeficientes de determinación de los polinomios tienen valores de 0.4967 para el ancho total, 0.5308 para primavera y 0.0331 para verano en los pinos del parque Ajusco, indicando que el periodo de crecimiento de los pinos con menor variabilidad es el verano (Fig. ).

Los coeficientes de determinación de las cronologías del parque Desierto de los Leones, tienen valores de 0.8905 para el ancho total, 0.8059, 0.6904 para primavera y verano respectivamente, mostrando así el periodo con menor variabilidad en el crecimiento es el verano (Fig. ). Sin embargo, el parque con mayor variabilidad en las 3 cronologías, es el Desierto de los Leones. La autocorrelación es mayor en los anchos de los anillos para el crecimiento de verano en las virutas colectadas en el DDLL y no así para el Ajusco.

De acuerdo con listados de especies de CONABIO y CONAFOR, la altitud a la que *Pinus patula* y *P. teocote* se distribuyen es hasta 3100 m.s.n.m., y los rodales muestreados en campo fueron a 3280 m.s.n.m., indicando la movilidad de la especie para asentarse en las altitudes con las temperaturas óptimas para su desarrollo.

En las tablas (3 & 4) siguientes se muestran los valores estadísticos de los datos divididos por décadas:

**Tabla 3.** Valores por décadas del crecimiento arbóreo de *Pinus sp.*, en el parque Ajusco (Prim.= primavera & Ver.= verano, S<sup>2</sup>= varianza y S= desviación estándar).

No.	Décadas	Prim. $\bar{x}$ (mm)	S <sup>2</sup>	S	Ver. $\bar{x}$ (mm)	S <sup>2</sup>	S
1	1916-1925	2.9741	1.3741	1.1722	0.8952	0.3662	0.6051
2	1926-1935	2.9931	0.1404	0.3747	0.9500	0.1849	0.4300
3	1936-1945	2.3159	0.0974	0.3121	0.7820	0.0186	0.1364
4	1946-1955	2.5099	0.1195	0.3457	0.7966	0.0064	0.0803
5	1956-1965	2.1252	0.0546	0.2337	0.8370	0.0045	0.0675
6	1966-1975	1.7367	0.0222	0.1490	0.7837	0.0024	0.0491
7	1976-1985	1.4245	0.0221	0.1487	0.6811	0.0096	0.0982
8	1986-1995	1.3313	0.0311	0.1764	0.6745	0.0118	0.1086
9	1996-2005	1.8345	0.0353	0.1878	0.8835	0.0109	0.1046
10	2006-2017	1.9010	0.0289	0.1702	0.9122	0.0315	0.1776

**Tabla 4.** Valores por décadas del crecimiento arbóreo de *Pinus sp.*, en el parque Desierto de los Leones (Prim.= primavera & Ver.= verano, S<sup>2</sup>= varianza y S= desviación estándar).

No.	Décadas	Prim. $\bar{x}$ (mm)	S <sup>2</sup>	S	Ver. $\bar{x}$ (mm)	S <sup>2</sup>	S
1	1911-1920	6.8644	6.3952	2.5288	1.7590	0.6493	0.8058
2	1921-1930	4.2031	0.8582	0.9264	1.5716	0.1288	0.3590
3	1931-1940	3.4306	0.2310	0.4806	1.4191	0.0627	0.2505
4	1941-1950	2.4111	0.0843	0.2903	1.0186	0.0237	0.1539
5	1951-1960	2.0779	0.0538	0.2321	1.0310	0.0360	0.1898
6	1961-1970	1.7422	0.0693	0.2633	0.7595	0.0220	0.1484
7	1971-1980	1.3541	0.0217	0.1474	0.4783	0.0083	0.0911
8	1981-1990	1.0836	0.0110	0.1050	0.4068	0.0046	0.0684
9	1991-2000	1.2449	0.0175	0.1326	0.4940	0.0042	0.0650
10	2001-2010	1.3819	0.0042	0.0648	0.5476	0.0057	0.0760
11	2011-2017	1.4944	0.1148	0.3388	0.6484	0.0136	0.1166

En las tablas se muestra que conforme pasan las décadas en el Ajusco (tabla 3), la varianza disminuye hasta la década de 1976-1985, y vuelve a disminuir en la última década (2006-2017) para primavera, y para verano la varianza tiene el mismo comportamiento. Para el parque DDLL (tabla 4), las varianzas en primavera disminuyen y aumentan en los años de 1991-2000, disminuyen en los siguientes 10 años y aumentan de nuevo en la última década (2006-2017).

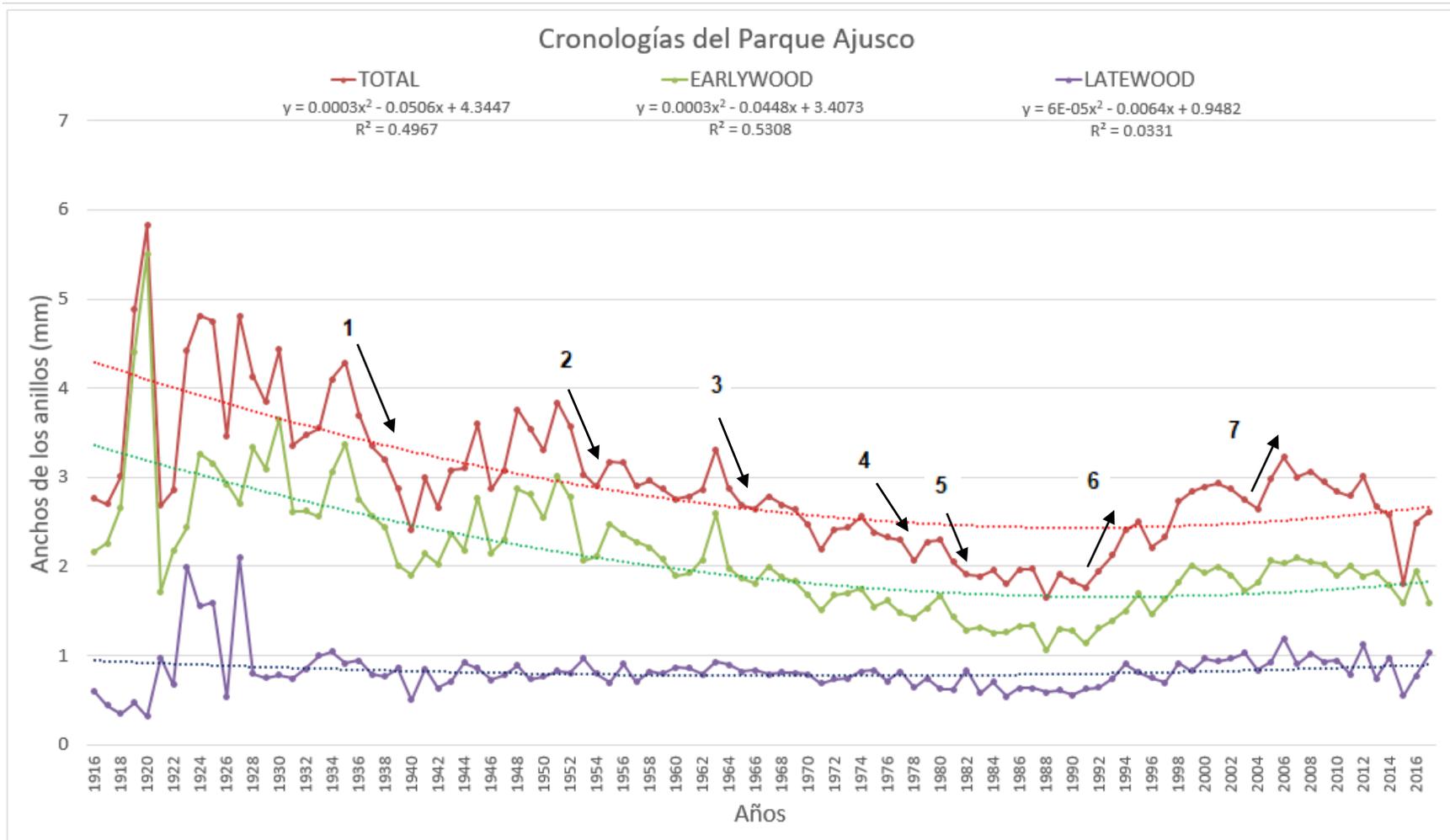


Figura . Se muestra la dendrocronología de *Pinus sp.*, colectados en el parque Ajusco. ROJO-Ancho total. VERDE-Anchos de primavera. MORADO-Anchos de verano.

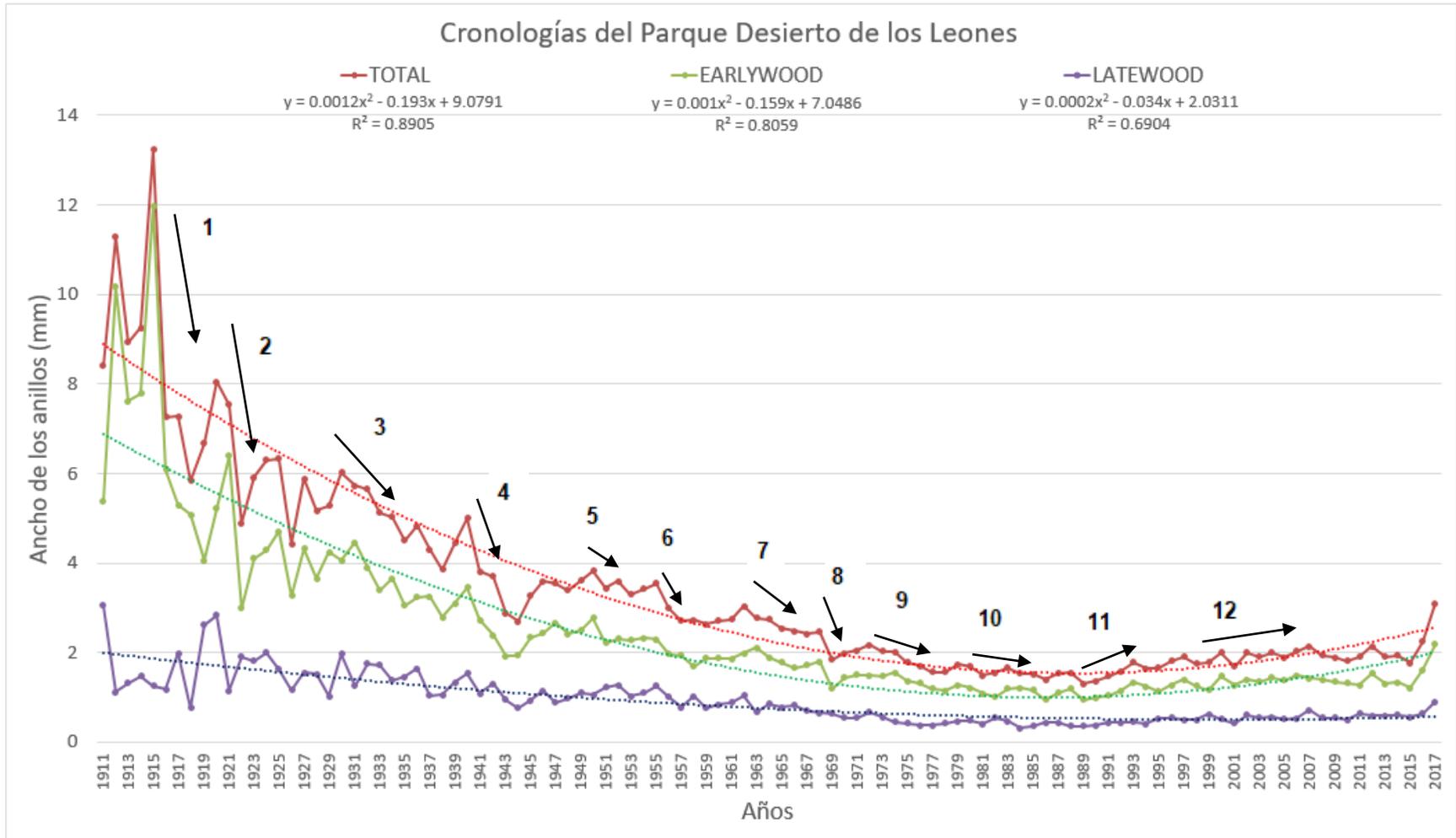


Figura . Se muestran las mediciones de los anillos de crecimiento de *Pinus sp.*, colectados en el Desierto de los Leones. ROJO-Ancho total. VERDE-Anchos de primavera. MORADO-Anchos de verano.

## **9.2 Temperaturas Máximas por para primavera y verano.**

Los datos de temperaturas máximas de primavera y verano, desde 1876 hasta 2016, se dividen en 3 etapas, siendo la primera etapa de 1876 a 1915 (Fig. ), la segunda de 1916 a 1974 (Fig. ) y la tercera de 1975 a 2016 (Fig. )

Durante la primera etapa que contempla finales del siglo XIX hasta 1915, las temperaturas máximas tanto en primavera como en verano parecen estables, sin embargo de 39 años de datos, el porcentaje de las temperaturas que no se encuentra entre las óptimas para la ciudad (25°C en primavera y 24°C en verano) es del 30.76% y 5.12% para primavera y verano respectivamente. Las temperaturas aumentan durante la segunda etapa (Fig. ), y el porcentaje de temperaturas que no están entre las óptimas es de 43.10% y 6.89% para primavera y verano respectivamente.

En la última etapa la temperatura máxima en primavera ha aumentado de 25° a casi 28°C promedio, y en verano ha aumentado de 23° a casi 26°C (Fig. 21); el porcentaje de temperaturas que no están entre las óptimas es de 68.29% y 41.46% para primavera y verano respectivamente.

El Niño y La Niña se presentaron 6 veces desde 1980 hasta el año 2000, incluyendo el evento extremo de 1997/98 que fuertemente afecto a México. Se ve reflejado en la figura 21 donde en 1997 se registró una media de 29.5°C para primavera.

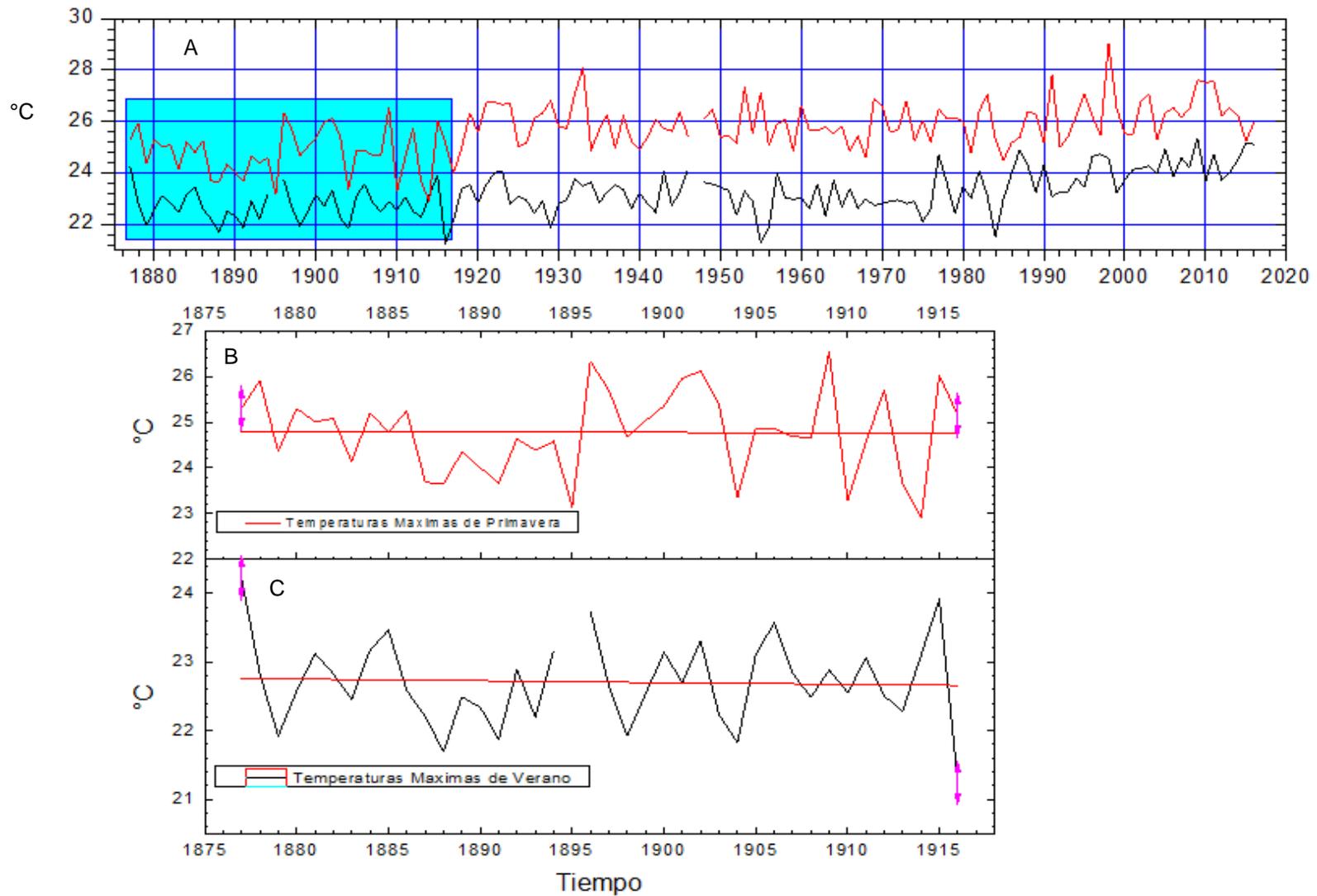


Figura . A) Periodo de 1876 a 1915 de temperaturas máximas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

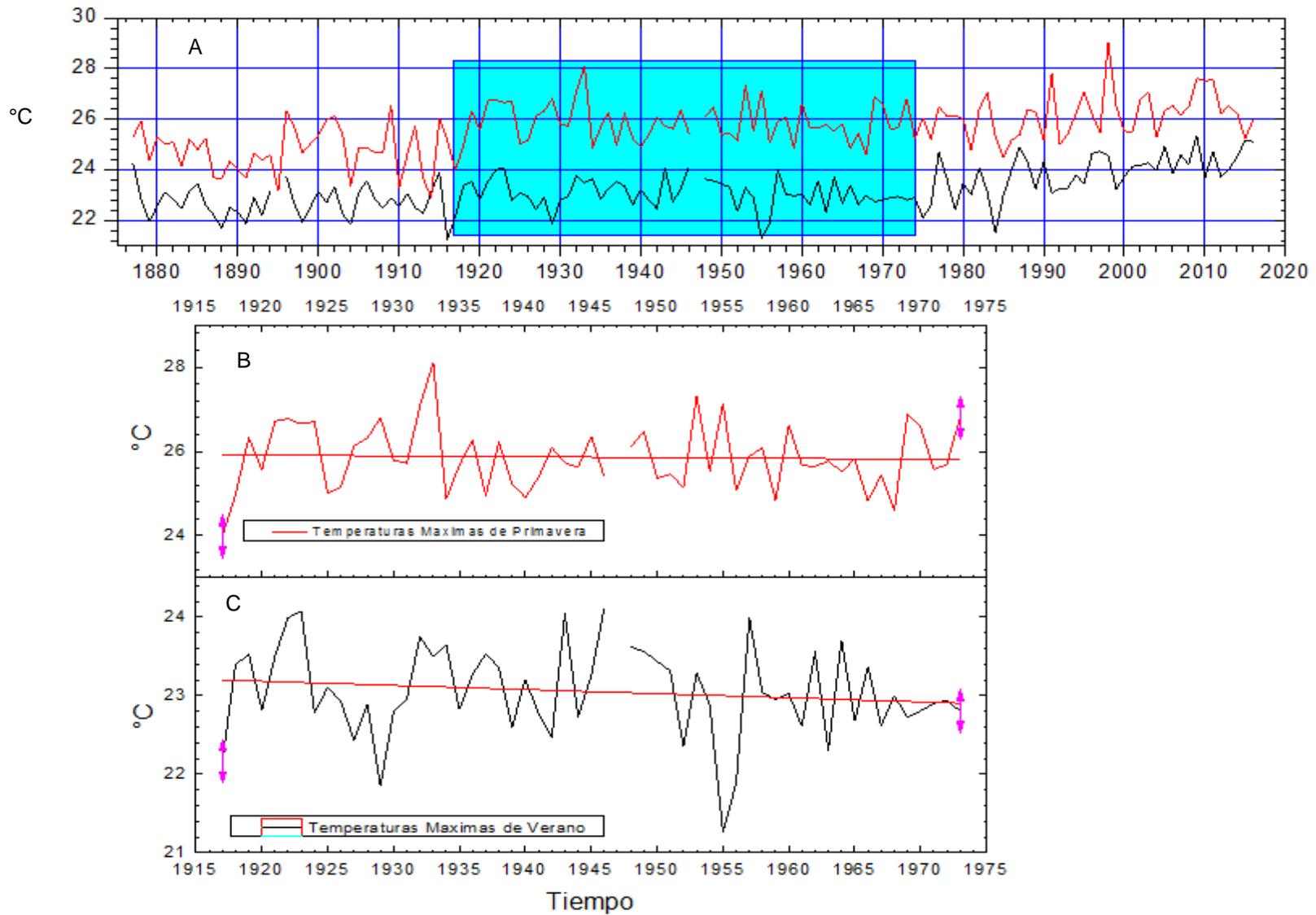


Figura . A) Periodo de 1916 a 1974 de temperaturas máximas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

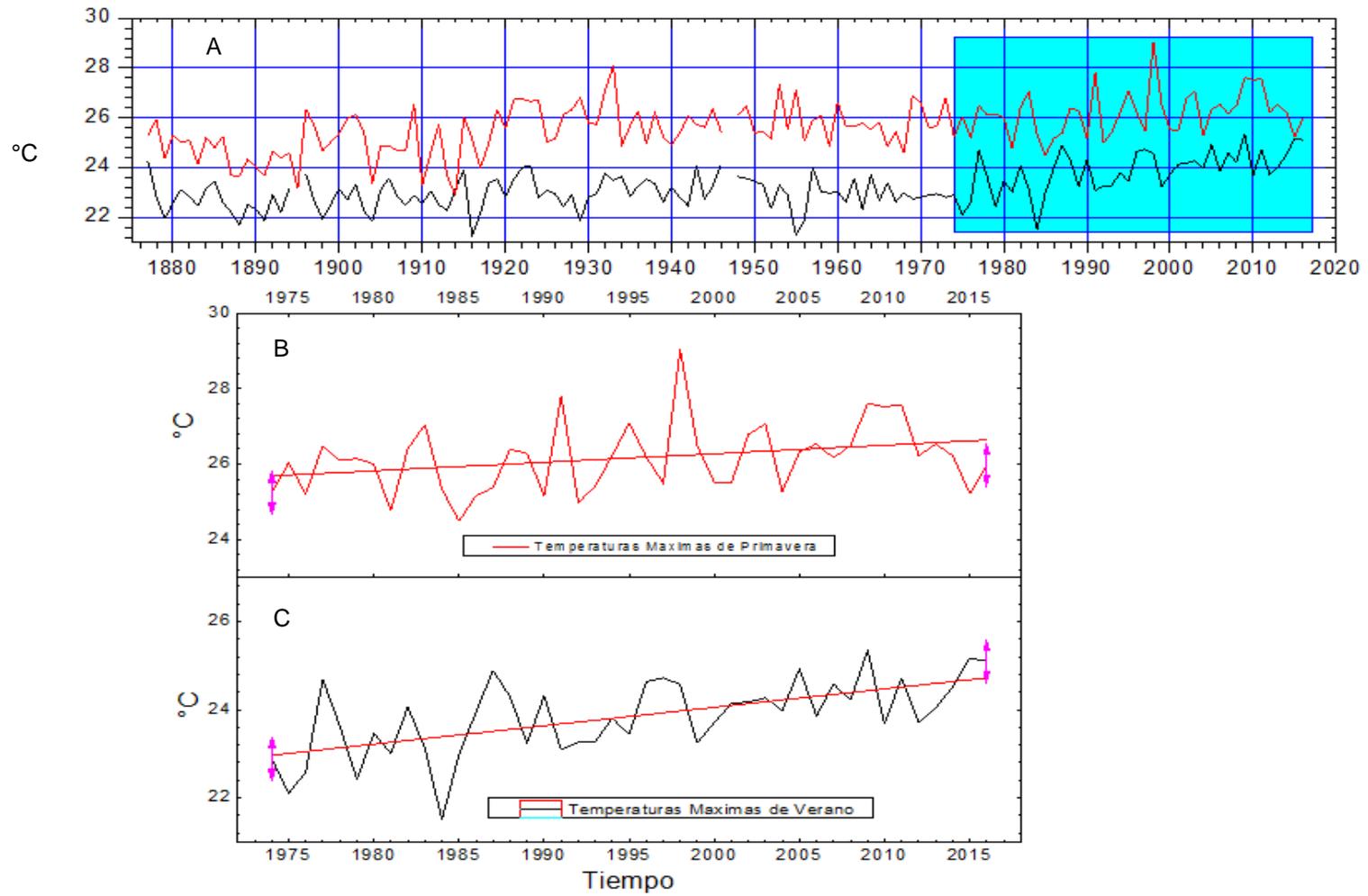


Figura . A) Periodo de 1975 a 2016 de temperaturas máximas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

### **9.3 Temperaturas Mínimas para primavera y verano.**

Las temperaturas mínimas tanto de primavera como de verano se dividen en 3 etapas. La primer etapa comprende los años de 1876 a 1915 (Fig. ), la segunda etapa comprende de 1916 a 1974 (Fig. ) y la tercera de 1975 a 2016 (Fig. ).

Las temperaturas presentan una tendencia estable desde 1876 hasta 1915 (Fig. 22), pero el porcentaje de temperaturas que no se encuentran en las óptimas ( $11^{\circ}\text{C}$  para primavera y  $12^{\circ}\text{C}$  para verano) para la ciudad es de 43.58% y 41.02%. Después se presenta un decremento abrupto de temperaturas en ambas temporadas, llegando a casi  $6^{\circ}\text{C}$  en primavera en la década de 1930 (Fig. ).

A partir de los años 30, las temperaturas mínimas han incrementado de manera rápida (Fig. y ), siendo casi las mismas temperaturas para primavera y verano y terminando con casi  $13^{\circ}\text{C}$  en el 2016 para ambas temporadas.

A finales del siglo XIX, la precipitación tienen una tendencia negativa, lo cual indica que decrecieron los milímetros de lluvia de 1876 a 1905 (Fig. ), teniendo un máximo de 220 mm para verano en 1877 y 70 mm para primavera en 1904, y un mínimo de 70 mm en verano de 1894 y casi 10 mm en primavera de 1876 y 1896.

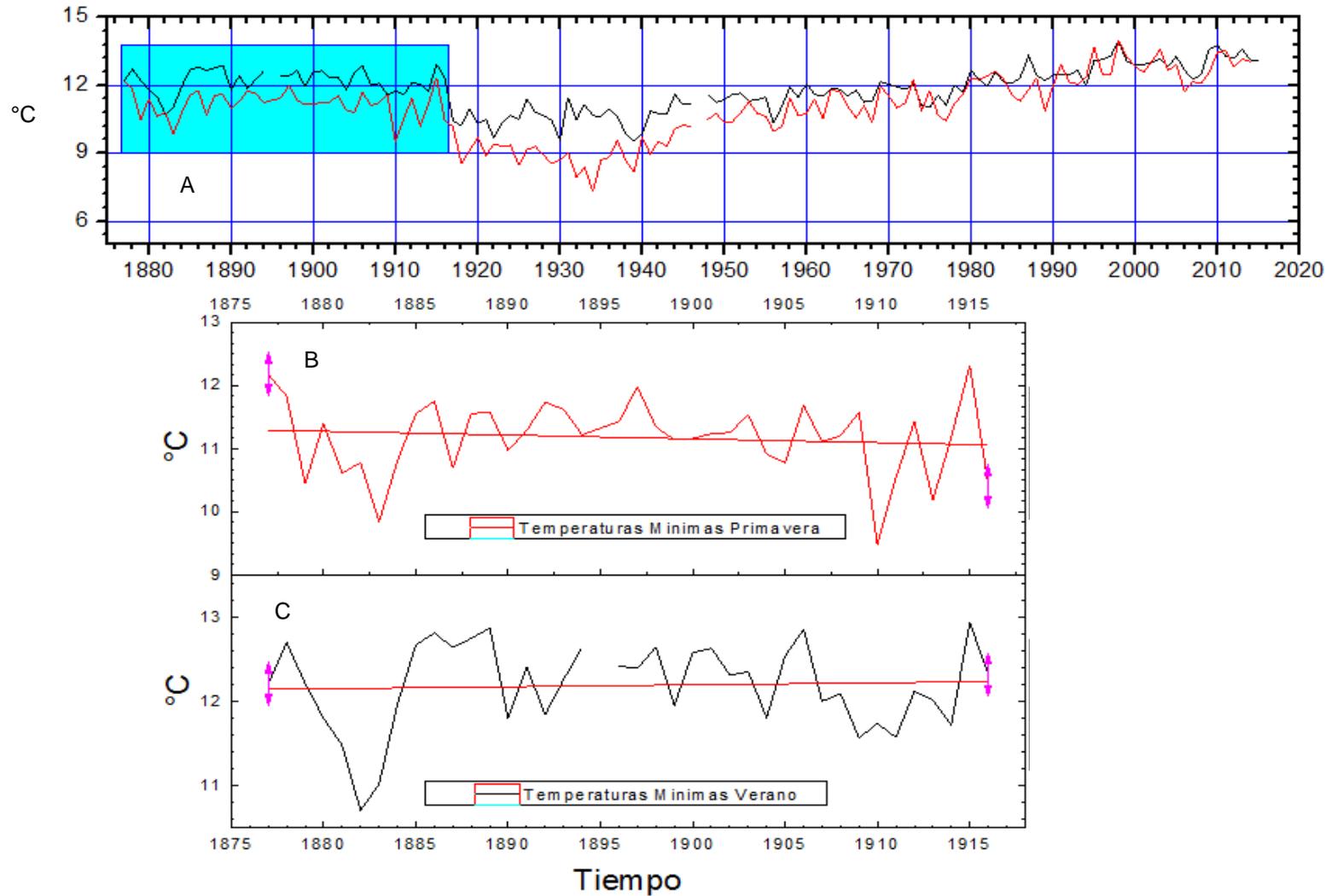


Figura 22. A) Periodo de 1876 a 1916 de temperaturas mínimas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

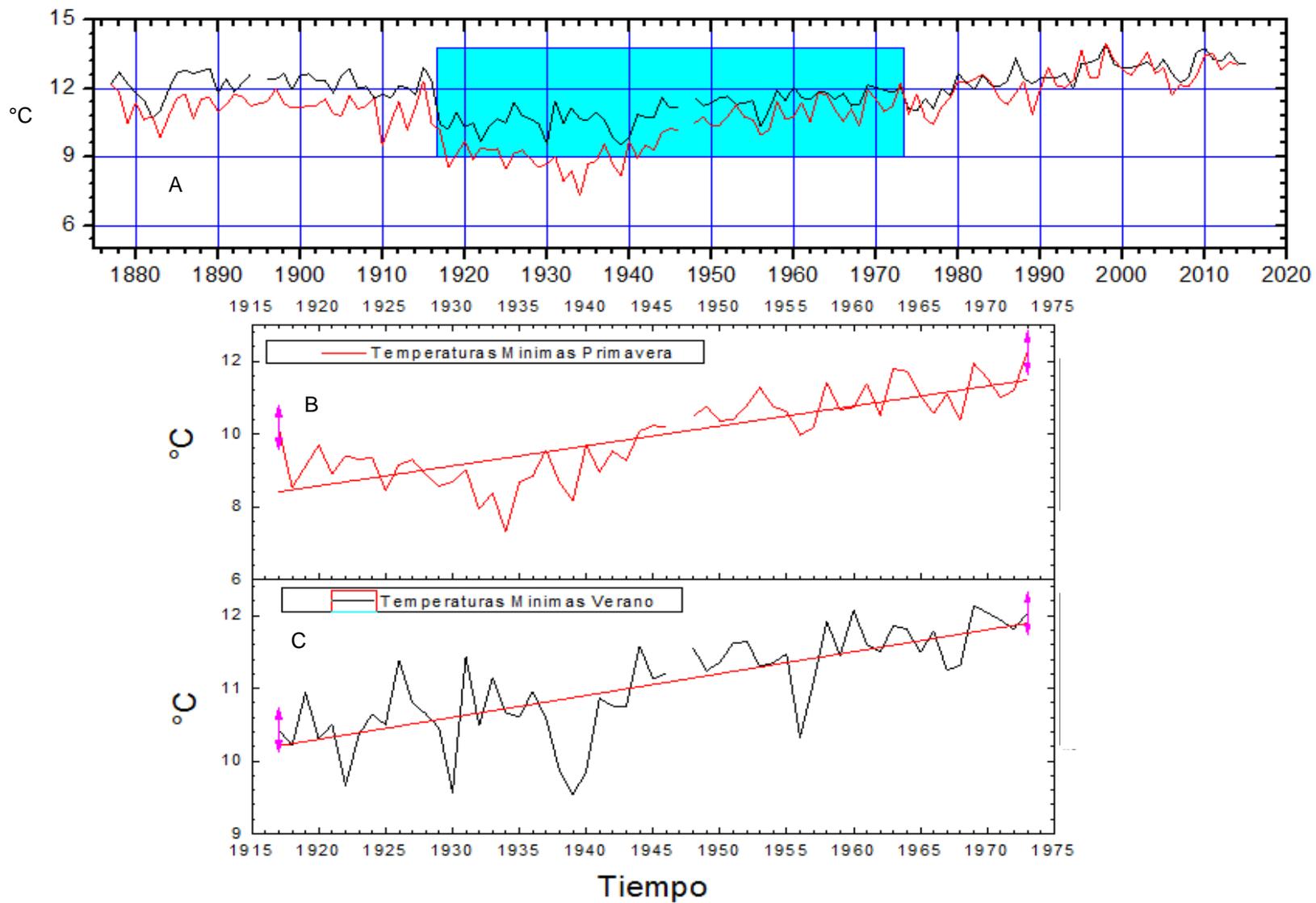


Figura 23. A) Periodo de 1916 a 1974 de temperaturas mínimas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

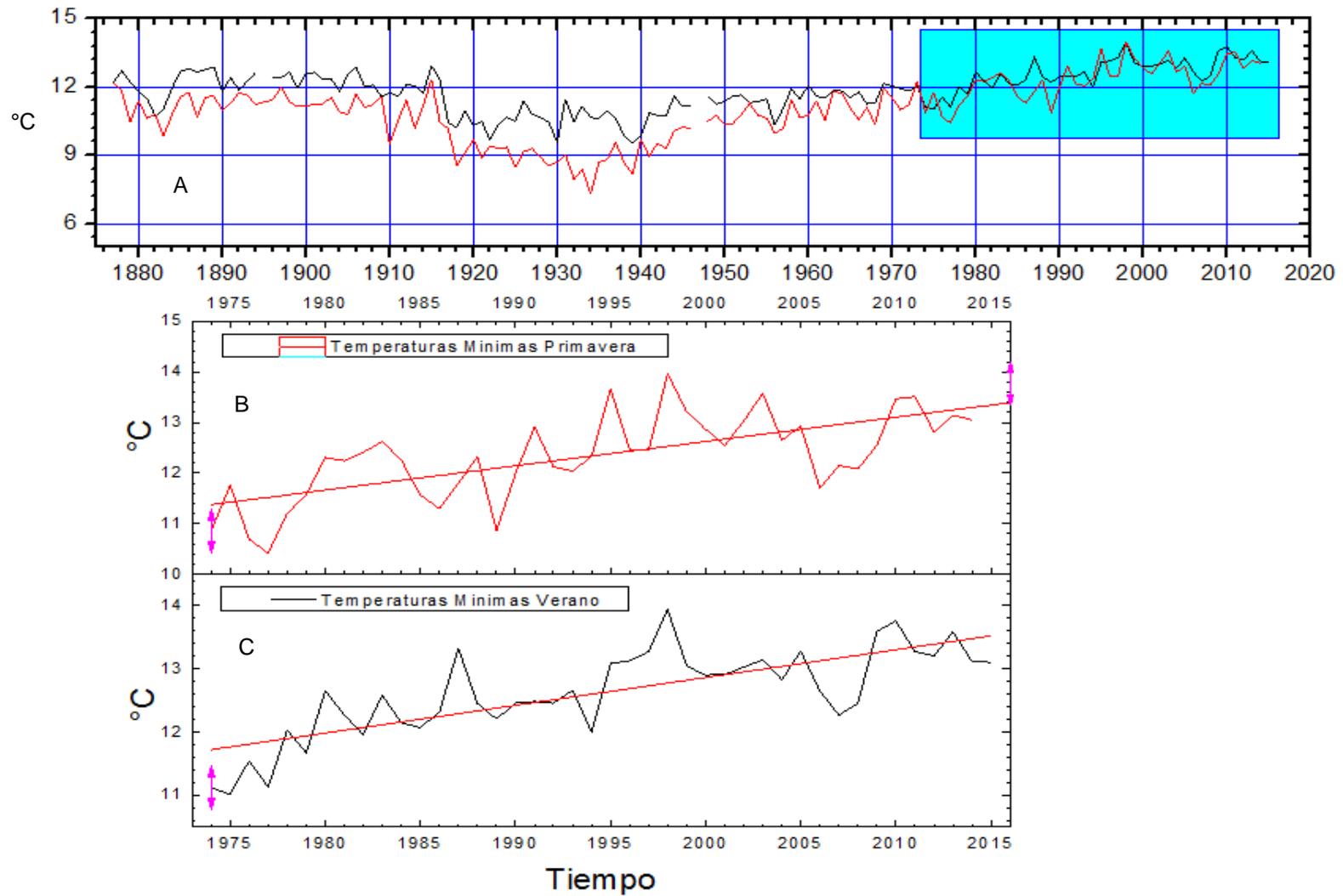


Figura 24. A) Periodo de 1974 a 2016 de temperaturas mínimas en B) primavera (Rojo) y C) verano (Negro).

#### **9.4 Precipitaciones en primavera y verano.**

Las precipitaciones a finales del siglo XIX y a lo largo del siglo XX, hasta principios del siglo XXI, se pueden dividir en 4 etapas; la primera etapa considera desde 1876 hasta 1905 (Fig. ), la segunda de 1906 a 1944 (Fig. ), la tercer etapa de 1945 a 1980 (Fig. ) y finalmente la cuarta etapa abarca desde 1981 a 2016 (Fig. ).

Empezando el siglo XX (Fig. , , ), las precipitaciones tienen una tendencia positiva lo cual indica que han aumentado con el paso de los años. Las lluvias en verano tienen mayor variación que las precipitaciones de primavera

Ambas temporadas de precipitación muestran una fuerte sequía entre 1980 y el 2000, pero después del año 2000 aumentan de manera abrupta de nuevo. Y en total se han registrado 39 sequías en todo el país, pero para el centro (incluyendo la Cd. de México), se categorizaron como severas en 1891, 1892, 1896, 1905, 1909, 1910. 1933, y posteriormente de 1980 al 2000 donde hubo casi 0 mm de lluvia promedio estacional.

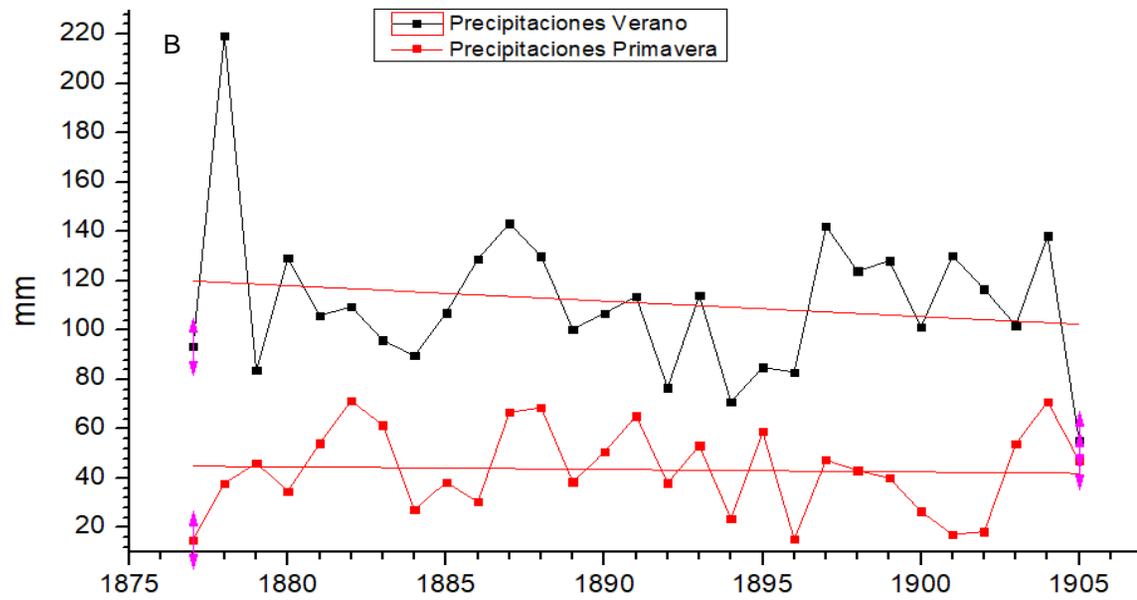
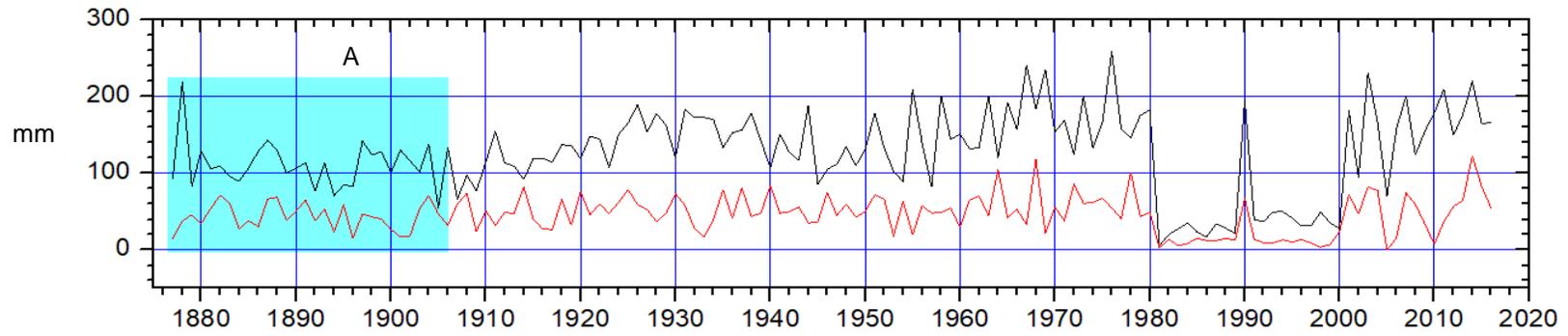


Figura 25. A) Periodo de 1876 a 1905 de precipitaciones en B) primavera (Rojo) y verano (Negro).

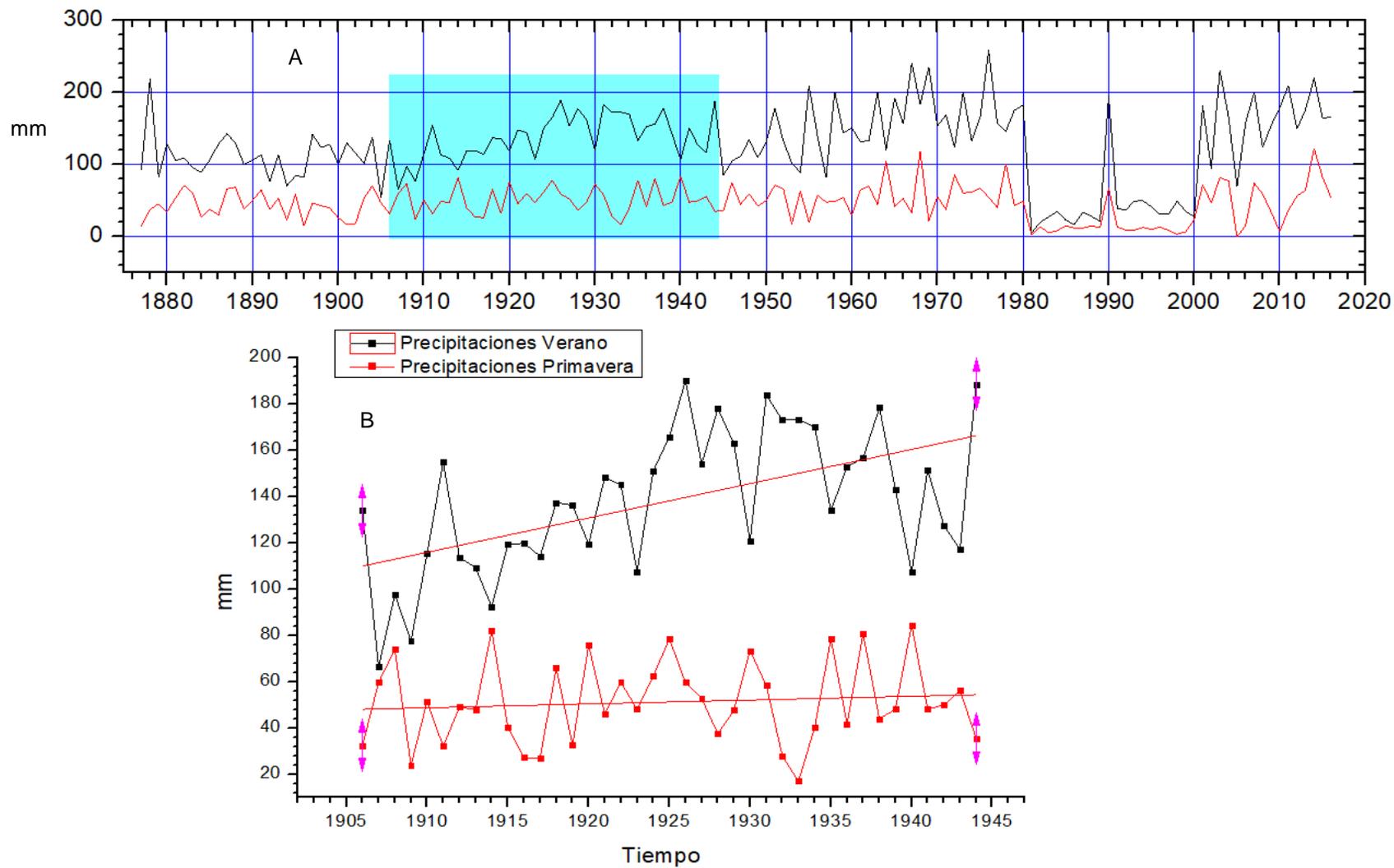


Figura 26. A) Periodo de 1906 a 1944 de precipitaciones en B) primavera (Rojo) y verano (Negro).

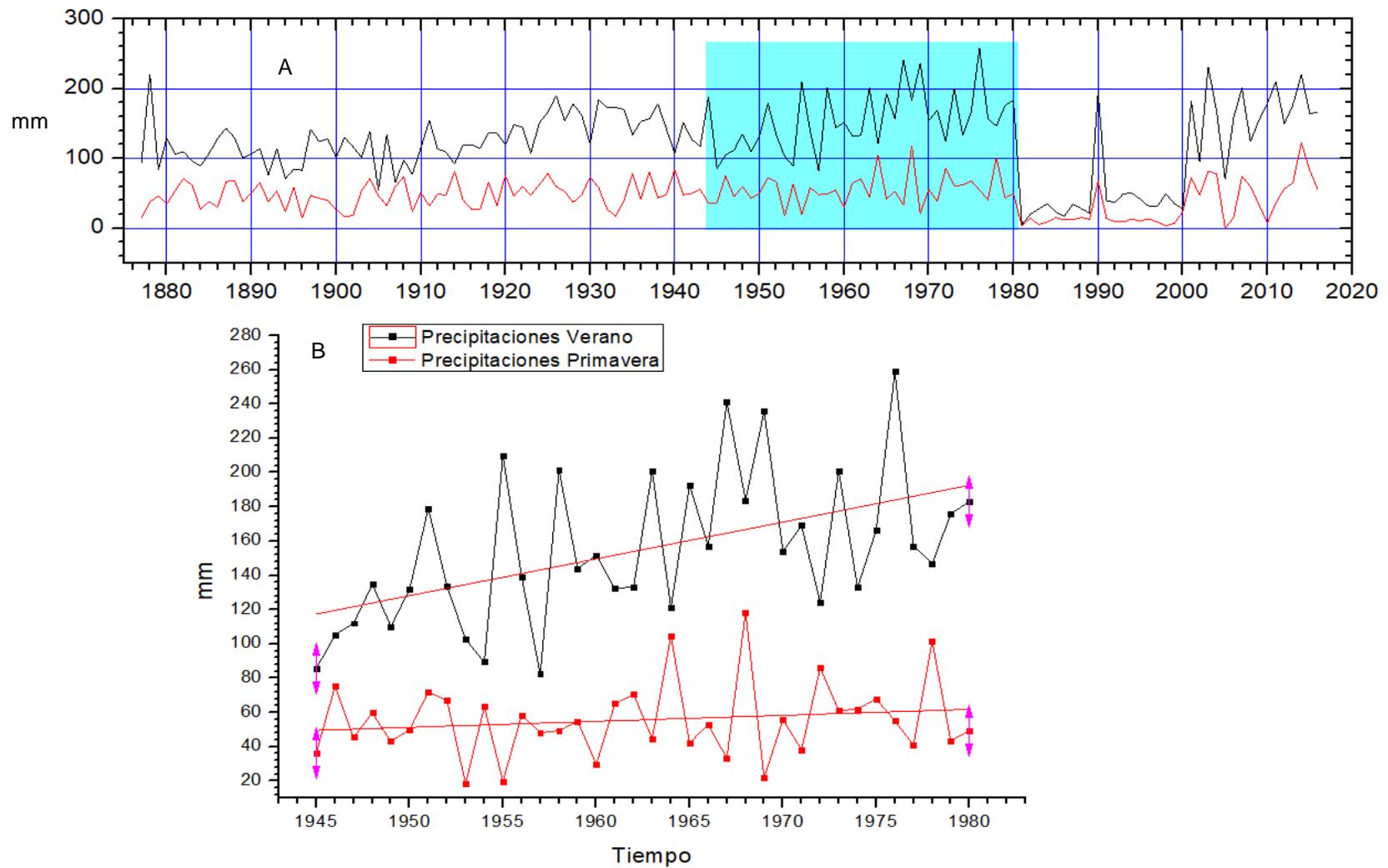


Figura 27. A) Periodo de 1945 a 1980 de precipitaciones en B) primavera (Rojo) y verano (Negro).

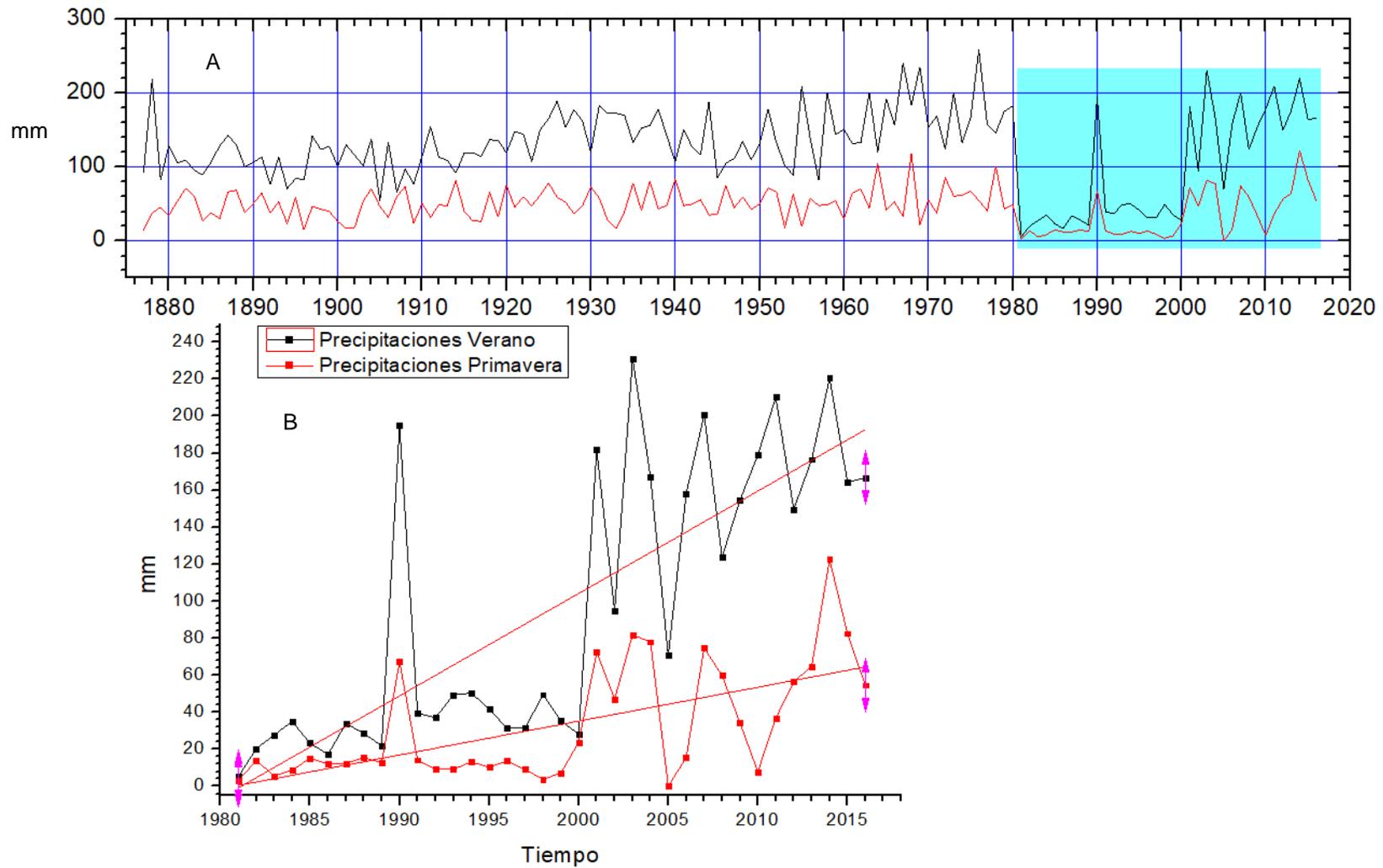


Figura 28. A) Periodo de 1981 a 2016 de precipitaciones en B) primavera (Rojo) y verano (Negro).

## **9.5 Ciclos de 10 años en Ganancias de los anillos, Precipitaciones y Temperaturas.**

Las ganancias de las cronologías de ambos parques se calcularon a razón del crecimiento de cierto año con respecto al año anterior a este.

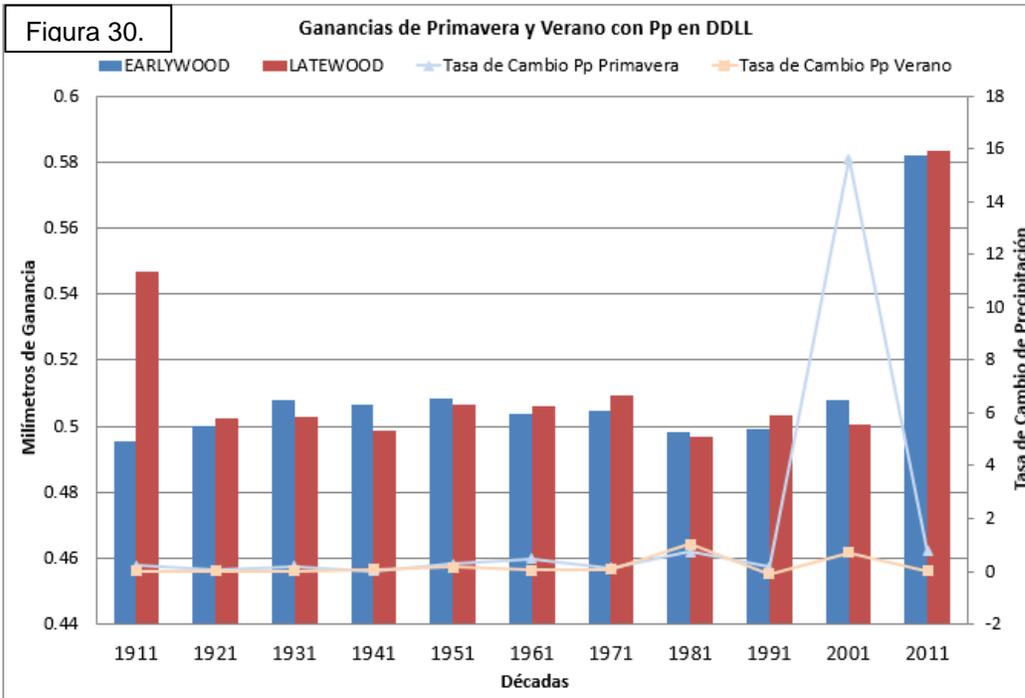
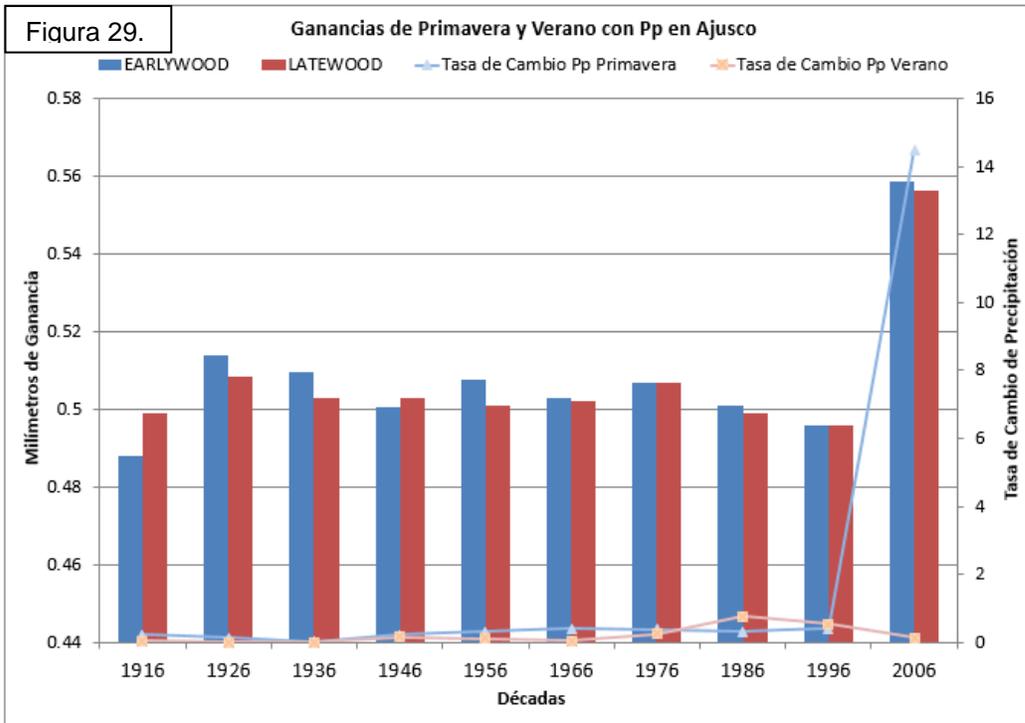
En la figura 29 se aprecia que la precipitación no tiene cambios abruptos en cuanto al porcentaje que llovió en las décadas de 1916-1925 hasta la década de 1956-1965, sin embargo, entre las décadas de 1966-1975 a 1986-1995 la tasa para las precipitaciones en verano aumenta casi 1%, y después a casi 0%.

La precipitación en primavera para el mismo periodo no tiene variaciones mayores a 0.5%, pero después de 1996 a 2006 tiene un aumento del 15%. Pero cuando la lluvia en ambas temporadas aumenta, se observa que las ganancias de los anillos de crecimiento del Ajusco decrecen, y en la última década aumentan de 0.49 mm a 0.56 mm, cuando la precipitación de primavera aumentó.

En la figura 30 se observa que para los mismos periodos que en Ajusco, la precipitación se mantiene estable en el Desierto de los Leones, pero a partir de la década de 1961 empieza a variar, y en la década de 2001-2011, se presenta el aumento abrupto de precipitación de hasta un 16% en primavera, lo cual se observa en la figura 28. Y las ganancias, al igual que en el Ajusco, aumentan en la última década hasta 0.58 mm cuando en los años de 2001 a 2011 alcanzan 0.5 mm.

Las ganancias tienen una relación inversa con las temperaturas máximas y mínimas tanto de primavera como verano, ya que se aprecia en las figuras 31 y 32, que cuando las temperaturas máximas decrecen en la década de los años 40,

las ganancias aumentan hasta 0.51 mm en el DDLL y se mantienen en el Ajusco con 0.5 mm.



Figuras 29 y 30. Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el Ajusco y DDLL (Primavera – Azul y Verano – Rojo), comparadas con las tasas de cambio de las precipitaciones de primavera y verano.

Figura 31.

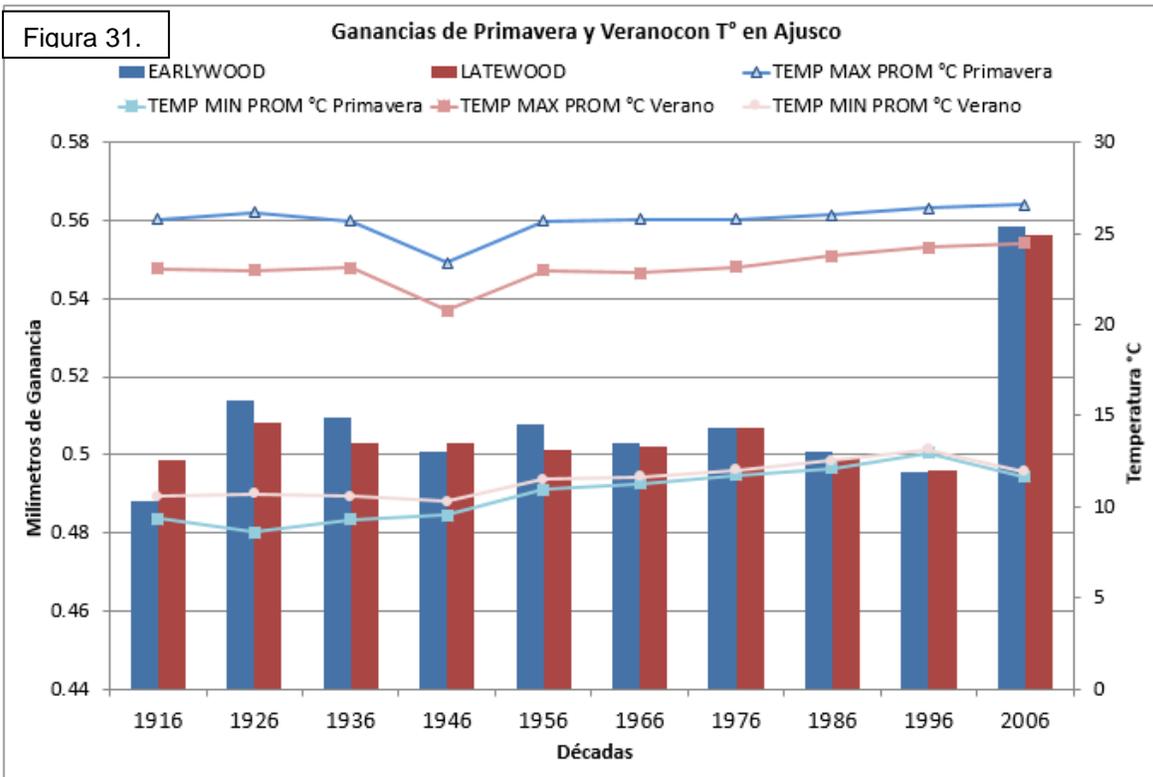
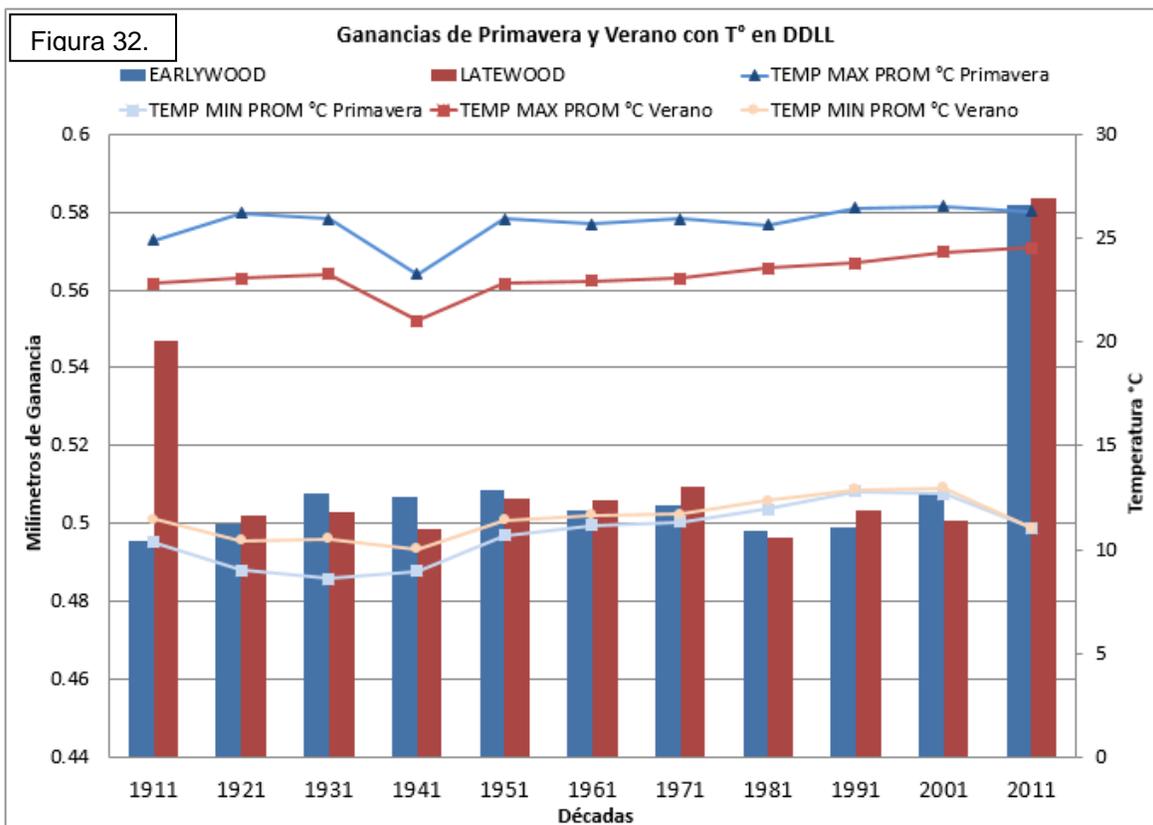


Figura 32.



Figuras 31 y 32. Ganancias de los anillos de crecimiento de los pinos colectados en el Ajusco y DDLL, comparadas con las Temperaturas máximas promedio de primavera y verano, y las Temperaturas mínimas de primavera y verano.

## 9.6 Índices de Sensibilidad Media.

En los índices de sensibilidad se muestran los eventos ocurridos de La Niña y El Niño durante todo el siglo XX, donde se observan los años en los que los pinos muestreados muestran mayor sensibilidad, como en los primeros 10 años debido al rápido crecimiento que los árboles poseen cuando son jóvenes. En la figura 33, los pinos del Ajusco varían de 0.0058 en el año 1925 cuando hubo evento de La Niña, hasta un máximo de 0.0075 en 1940 cuando hubo evento de El Niño, después hay una estabilidad hasta 1980, cuando hubo una sequía (Fig.28), y se presentaron 4 eventos de El Niño y La Niña hasta el año 2000, incluyendo el evento extremo de 1997/98. Después del año 2000 se presentaron 4 eventos hasta el 2010 con intensidades débiles y moderadas.

El índice para el DDLL, muestra gran variabilidad en los primeros 10 años y hasta 1929, de 0.0052 hasta un máximo de 0.0085 para verano y para primavera un máximo de 0.0079 y un mínimo de 0.0053. Durante tal periodo se presentaron 6 eventos de El Niño y La Niña. De 1945 a 1962 se presentan variaciones desde 0.0059 mínimo y 0.0066 máximo en primavera y 0.0056 mínimo y 0.0068 máximo en verano. A partir de 1983 las variaciones en la sensibilidad en verano empiezan a fluctuar para verano de 0.006 hasta 0.007 en el año 2001, y posteriormente en los últimos 8 años se estabiliza en 0.007 promedio, indicando que en verano los árboles son más sensibles a los cambios en temperatura y precipitación y a los eventos naturales de El Niño y La Niña que en primavera. A los datos de las Ganancias y las Medias de Sensibilidad se les aplicaron un Análisis de Regresión Múltiple (Hair, *et. al.*, 1995) para encontrar la relación de estas variables con las temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones de primavera y verano.

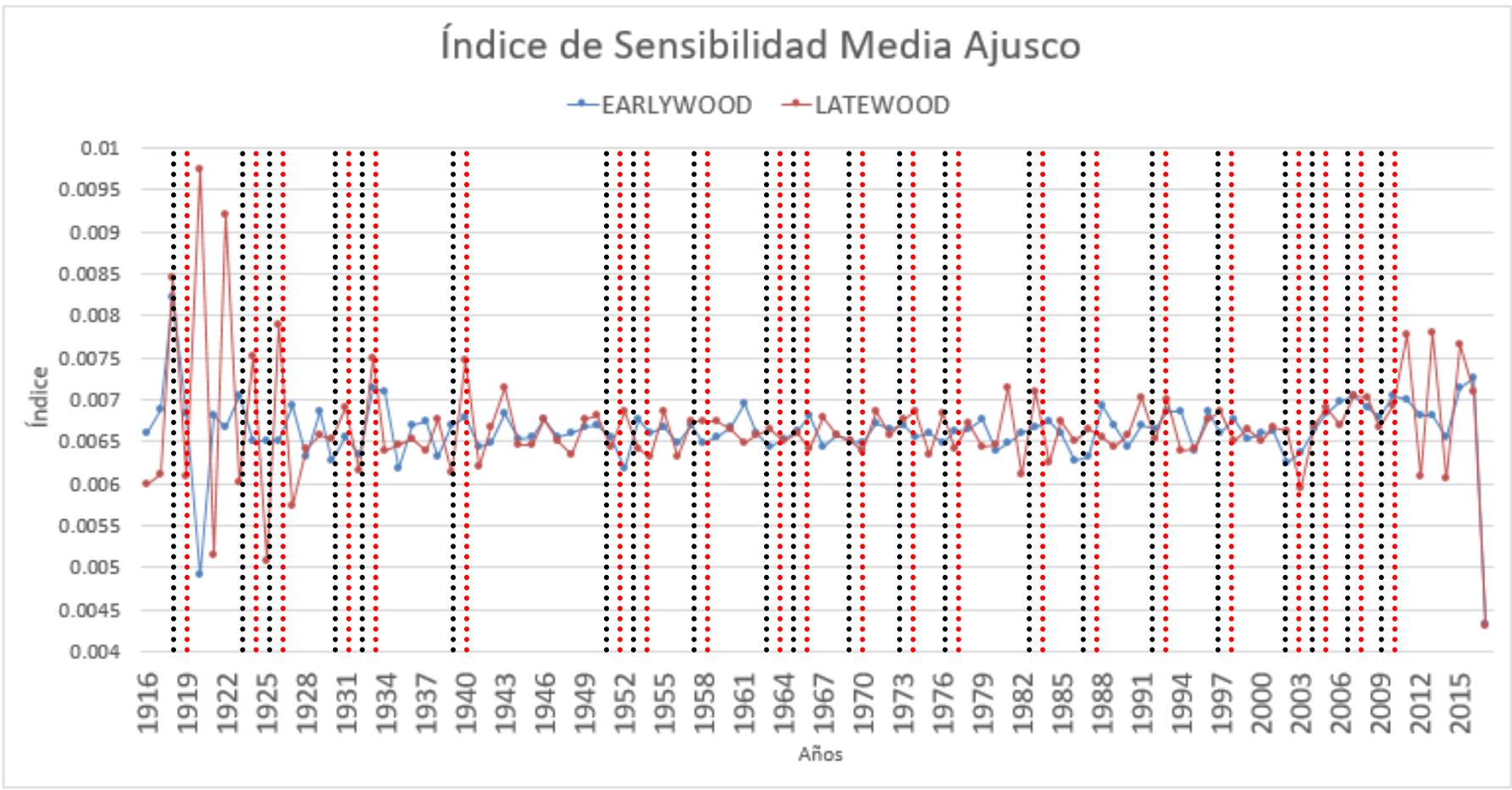


Figura 33. Índice de sensibilidad media de los pinos colectados en el parque Ajusco, desde 1916 hasta 2016. Madera temprana (primavera) en azul, y madera tardía (verano) en rojo, incluyendo eventos de El Niño (negro) y La Niña (rojo claro). Ecuación tomada de Creus y Puigdefábregas (1976).

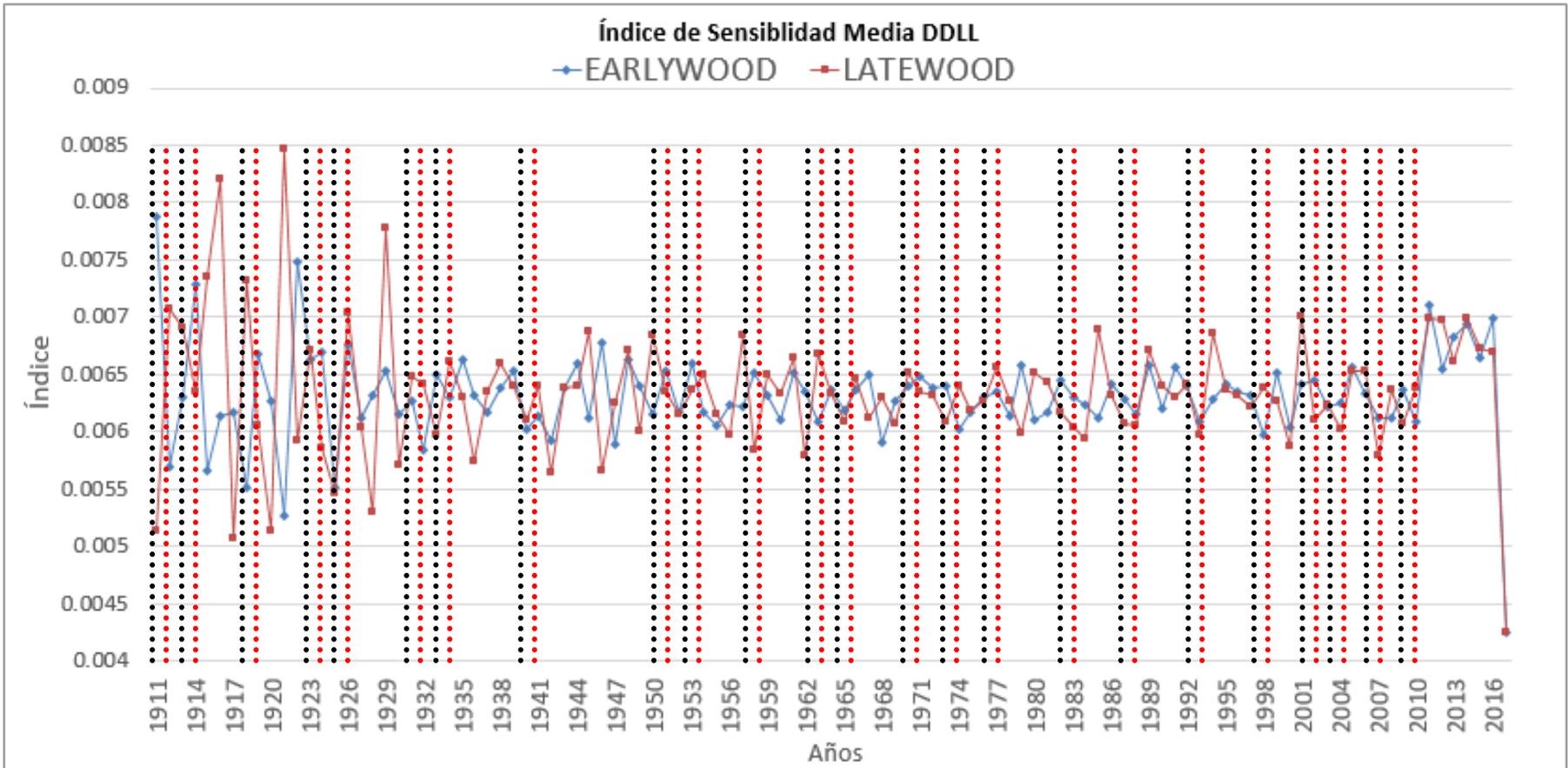


Figura 34. Índice de sensibilidad media de los pinos colectados en el parque Desierto de los Leones, desde 1911 hasta 2016. Madera temprana (primavera) en azul, y madera tardía (verano) en rojo, incluyendo eventos de El Niño (negro) y La Niña (rojo claro). Ecuación tomada de Creus y Puigdefábregas (1976).

## 9.7 Análisis de Regresión Múltiple de las Ganancias.

**Tabla 5.** Correlaciones de las Ganancias del Ajusco con precipitación y temperaturas. (Cuadro rojo – Correlaciones, paréntesis – Número de muestras, Cuadro verde – P-Value). Los valores de P menores a 0.05 indican correlaciones no nulas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%.

### Correlations

	Ganancias Ajusco Primavera	Precipitaciones P	Temperaturas Maximas P	Temperaturas Minimas P
Ganancias Ajusco Primavera		0.9201	0.3348	0.1095
		(10)	(10)	(10)
		0.0002	0.3443	0.7634

### Correlations

	Ganancias Ajusco Verano	Precipitaciones V	Temperaturas Maximas V	Temperaturas Minimas V
Ganancias Ajusco Verano		-0.1945	0.3767	0.0502
		(10)	(10)	(10)
		0.5904	0.2833	0.8905

Las ganancias de los anillos de los pinos del Ajusco tienen una  $r$  de 0.9201 con la precipitación en primavera, lo cual se refiere a que tiene una relación positiva con el régimen de lluvias en los meses de marzo a junio, que es cuando el árbol deja de estar en dormancia y comienza a crecer de nuevo. Tienen una  $r$  de 0.3348 con las temperaturas máximas y de 0.1095 con las temperaturas mínimas; ambas  $r$  tienen un valor positivo, lo cual indica que las temperaturas también tienen cierta influencia sobre el crecimiento arbóreo en los árboles de este parque nacional.

En cuanto a verano, las ganancias de los anillos, la  $r$  para las precipitaciones en esta temporada resultó negativa (-0.1945), mostrando que los pinos no crecen debido a las lluvias, al contrario se ve sesgado el crecimiento por la cantidad de agua que hay en verano, sin embargo, las  $r$  para las temperaturas máximas y mínimas de verano resultaron en 0.3767 y 0.0502 respectivamente, indicando que la temperatura es más influyente sobre el crecimiento que las lluvias en esta temporada del año (Fig. 17), aun así, el valor de correlación de las dos temperaturas con las ganancias de los anillos son menos de 0.5, lo cual significa

que la relación que tienen las temperaturas con las ganancias de los anillos es “baja”.

**Tabla 6.** Correlaciones de las Ganancias del DDLL con precipitación y temperaturas (Cuadro rojo – Correlaciones, paréntesis – Número de muestras, Cuadro verde – P-Value). Los valores de P menores a 0.05 indican correlaciones no nulas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%.

**Correlations**

	Ganancias DDLL Primavera	Temperatura Maxima P	Temperatura Mínima P	Precipitaciones P
Ganancias DDLL Primavera		0.2065	0.0227	-0.0050
		(11)	(11)	(11)
		0.5425	0.9472	0.9884

**Correlations**

	Ganancias DDLL Verano	Temperatura Maxima V	Temperatura Mínima V	Precipitaciones V
Ganancias DDLL Verano		0.3740	-0.1508	-0.3104
		(11)	(11)	(11)
		0.2572	0.6581	0.3530

Para los Pinos del Desierto de los Leones, las ganancias tienen una relación negativa con las precipitaciones para ambas temporadas de crecimiento, para primavera la r resultó en -0.0050, aunque es casi 0, lo cual indica que no tienen una relación muy significativa, y para verano resultó en -0.3104, mostrando que las lluvias en verano poseen una relación más estrecha con el crecimiento que en primavera.

Las r para las temperaturas máximas y mínimas en primavera resultaron en 0.2065 y 0.0227 respectivamente, indicando que las temperaturas máximas tienen una relación más significativa con el crecimiento en primavera que las mínimas, y se muestra casi igual para las temperaturas en verano, con una r de 0.3740 para las máximas y -0.1508 para las mínimas; la diferencia es que en verano las temperaturas mínimas tienen una relación negativa con las ganancias.

## 9.8 Análisis de Regresión Múltiple de las Medias de Sensibilidad.

**Tabla 7.** Correlaciones de la Media de Sensibilidad del Ajusco con precipitación y temperaturas (Cuadro rojo – Correlaciones, paréntesis – Número de muestras, Cuadro verde – P-Value). Los valores de P menores a 0.05 indican correlaciones no nulas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%.

Correlations				
	Media de Sensibilidad Ajusco P	Temperatura Maxima P	Temperatura Mínima P	Precipitaciones P
Media de Sensibilidad Ajusco P		0.3201	-0.0849	0.7472
		(10)	(10)	(10)
		0.3672	0.8157	0.0130

Correlations				
	Media de Sensibilidad Ajusco V	Temperatura Maxima V	Temperatura Mínima V	Precipitaciones V
Media de Sensibilidad Ajusco V		0.1841	-0.2986	-0.2925
		(10)	(10)	(10)
		0.6107	0.4021	0.4121

Los índices de Media de Sensibilidad de los pinos del Ajusco se relacionan fuertemente con las precipitaciones en primavera con una r de 0.7472, mostrando que los pinos son sumamente sensibles a la cantidad de agua que se presenta en este parque nacional, ya que para las precipitaciones de verano, la r fue de -0.2925, indicando las lluvias en esta temporada tienen una relación negativa con el crecimiento.

En cuanto a las temperaturas máximas de primavera y verano, ambas tienen una r positiva, siendo estas de 0.3201 y 0.1841 respectivamente, indicando que los pinos son sensibles a la temperatura máxima, a diferencia de las temperaturas mínimas para ambas temporadas, debido a que las r resultaron en -0.0849 y -0.2986; siendo negativos ambos valores, se muestra que los pinos del parque Ajusco son más sensibles a las temperaturas máximas que a las temperaturas mínimas, principalmente en primavera.

**Tabla 8.** Correlaciones de la Media de Sensibilidad del DDLL con precipitación y temperaturas (Cuadro rojo – Correlaciones, paréntesis – Número de muestras, Cuadro verde – P-Value). Los valores de P menores a 0.05 indican correlaciones no nulas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%.

**Correlations**

	Media de Sensibilidad DDLL P	Temperaturas Maximas P	Temperaturas Mínimas P	Precipitaciones P
Media de Sensibilidad DDLL P		0.1146	-0.1302	-0.1540
		(11)	(11)	(11)
		0.7371	0.7028	0.6513

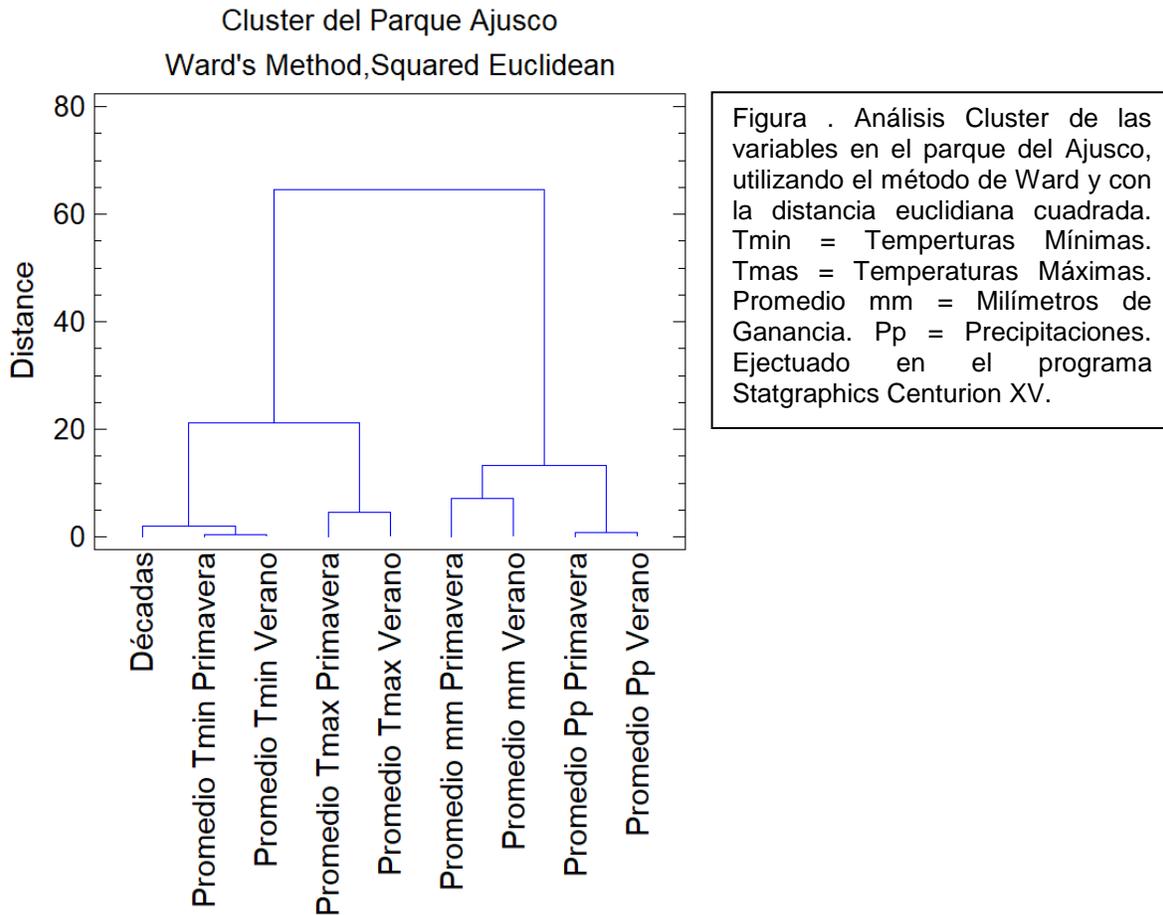
**Correlations**

	Media de Sensibilidad DDLL V	Temperaturas Maximas V	Temperaturas Mínimas V	Precipitaciones V
Media de Sensibilidad DDLL V		0.1715	-0.3498	-0.3022
		(11)	(11)	(11)
		0.6142	0.2916	0.3664

La Media de Sensibilidad de los pinos del Desierto de los Leones muestra relación negativa con las temperaturas mínimas y con las precipitaciones de primavera, con r de -0.1302 y -0.1540 respectivamente, mientras que para las temperaturas máximas la r es de 0.1146, mostrando que son sensibles a las altas temperaturas de esta temporada.

Para verano, los pinos muestran ser más sensibles a las temperaturas máximas por igual, ya que la r es positiva, con un valor de 0.1715; mientras que para las temperaturas mínimas y las precipitaciones de esta temporada, presentan una relación negativa con valores de r de -0.3498 y -0.3022 respectivamente, indicando que son más sensibles a las altas temperaturas que a las bajas y lluvias.

## 9.9 Análisis Cluster.



El análisis para el Ajusco (Fig. ) demuestra que el comportamiento de las temperaturas mínimas de primavera y verano es similar, por lo que las agrupa dentro de un cluster que después se integra con el grupo de las temperaturas máximas de ambas temporadas; la distancia a la que estos conglomerados se encuentran indica que las temperaturas mínimas tienen mayor similitud entre sí, que las máximas. Por otro lado las ganancias en milímetros están dentro de un grupo que después se integra a otro cluster con el grupo de las precipitaciones, demostrando que las lluvias tienen una influencia mayor en el Ajusco, a diferencia del DDLL.

Cluster del Parque DDLL  
Ward's Method, Squared Euclidean

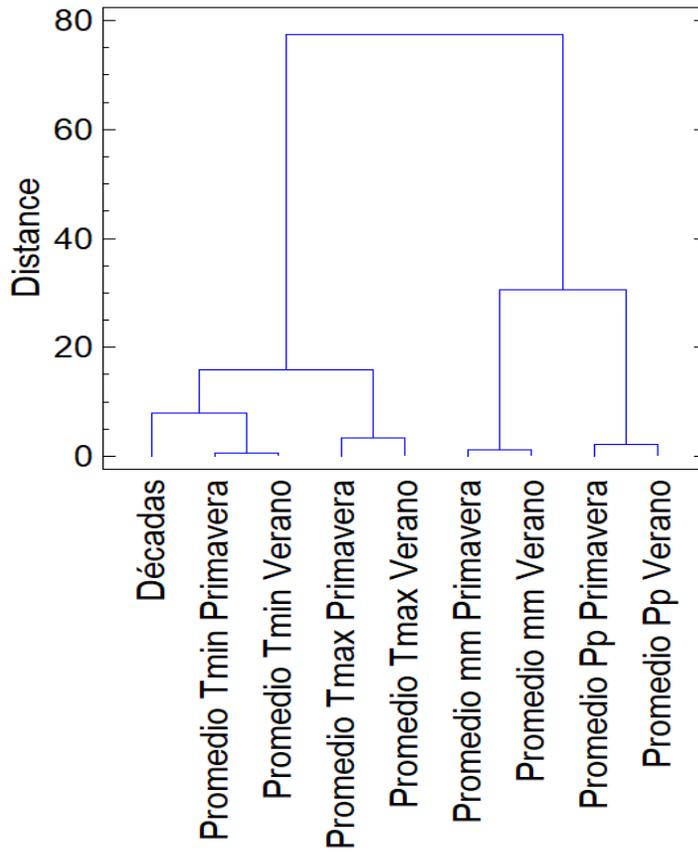


Figura . Análisis Cluster de las variables en el parque del Desierto de los Leones, utilizando el método de Ward y con la distancia euclidiana cuadrada. Tmin = Temperturas Mínimas. Tmas = Temperaturas Máximas. Promedio mm = Milímetros de Ganancia. Pp = Precipitaciones. Ejectuado en el programa Statgraphics Centurion XV.

## **X. DISCUSIÓN**

Las precipitaciones han aumentado en los últimos 30 años del siglo XIX (1870-1900), y para el siglo XX (1900-2000), poseen una tendencia a estabilizarse, especialmente las lluvias de primavera, a pesar de que sigan aumentando a un paso ligero, esto es solo hasta 1980 al 2000 donde los datos indican una sequía abrupta, que pudo deberse al aumento del uso de combustibles fósiles en la ciudad y la pérdida de vegetación en esas décadas dando lugar a cambios en otros factores climáticos como la temperatura, a diferencia de como Martínez-López (2018) refiere en su artículo, donde expone que los ciclos de sequía y aguaceros son naturales indicando que las precipitaciones siguen una tendencia positiva en los últimos 63 años (1951-2013). Jáuregui-Ostos (2004) sugiere que el cambio de uso de suelo es un punto de partida para que los ciclos de precipitación cambien en la ciudad.

De acuerdo con lo descrito por Fritts (1976) y Cook (1990) los árboles tienen una relación con el régimen del clima local. Los ciclos de vida y de crecimiento de las comunidades arbóreas en cada parque nacional están relacionados con la precipitación y temperatura

En el parque del Ajusco los pinos son más susceptibles a la cantidad de agua que pueden captar en primavera más que nada, ya que tienen que obtener toda el agua necesaria para poder reiniciar su crecimiento al salir del estado de dormancia que provoca el otoño e invierno, y posteriormente reservar esa agua para verano y centrar su crecimiento en los procesos de fotosíntesis y poder general reservorios de energía para el siguiente año.

Esto también se puede deber a la topografía que posee el Ajusco, presentando gran cantidad de cañadas y de pendientes con mayores grados de inclinación que en el Desierto de los Leones, ocasionando que el agua de las precipitaciones, sean o no aguaceros, escurra por todo el cerro, y debido a deforestación, esta agua no puede ser captada debidamente por los pinos, provocando un déficit de agua en esta zona.

Dependiendo de la temporada (primavera o verano), los pinos ocupan distintos recursos para su crecimiento, ya sea agua, o productos de la fotosíntesis. El crecimiento de los pinos del Desierto de los Leones es más afectado por las temperaturas máximas que se están volviendo más cálidas con el paso de los años (Fig. 19, 20 & 21), debido a que se incrementa la cantidad de gases contaminantes en la atmosfera de la ciudad, generando “Islas de Calor”.

Por acción de los vientos, estos contaminantes (ozono, dióxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, entre otros) se concentran en las partes altas de las serranías que rodean la ciudad, siendo estos los parques nacionales como el Ajusco y Desierto de los Leones, donde la población de bosques es principalmente de pinos y otras coníferas; sin embargo los pinos son más sensibles a los factores climáticos (lluvias y temperaturas) que las demás especies por las altitudes a las que se encuentran normalmente.

Los fenómenos naturales como El Niño y La Niña también ejercen cierto cambio en los regímenes de temperaturas y lluvias sobre la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que a pesar de que son eventos de variabilidad climática y no de cambio climático, se puede ver que la frecuencia e intensidad de estos

fenómenos naturales son mayores (Fig. 30 y 31), y esto sí es debido al cambio climático que estamos imponiendo.

Por consecuencia del aumento en la ciclicidad de estos fenómenos globales, las temperaturas aumentan, provocando sequías graves (Fig. 25), pero también el aumento de lluvias, y de la intensidad de estas.

Fritts (1976) indica que la fotosíntesis en los pinos se inhibe cuando la temperatura sobrepasa los 35°C y cuando es menor a 2°C; y mientras las temperaturas máxima y mínimas sigan aumentando en la ciudad, la tasa de evapotranspiración de los pinos de la ciudad será mayor por lo cual el árbol crecerá menos, el árbol tendrá menos tiempo para abrir las estomas y comenzar la evapotranspiración durante la mañana de cada día, y debido a esto, gastará más del recurso agua y tendrá menos recursos para usar en la síntesis de glucosa, inhibiendo el crecimiento por completo y eventualmente los procesos de reproducción también.

Los anillos de crecimiento analizados tienen una relación más estrecha con las temperaturas máximas de primavera y verano, ya que siendo estas las estaciones del año en la que los pinos crecen, necesitan de las condiciones adecuadas para poder realizar su metabolismo en primavera con las reservas del año anterior, y depender más de la fotosíntesis en verano; si las temperaturas de 30 o más grados empiezan a ser más frecuentes hay probabilidad de que estos procesos se inhiban como lo menciona Fritts (1971 & 1976) y Pallardy (2008).

En el parque del Ajusco la precipitación es un factor importante para los árboles en primavera para poder capturar el agua necesaria para realizar

fotosíntesis en verano y generar nutrientes para crecer, pero debido a la orografía que este parque posee, y debido a la deforestación, como lo menciona Vargas-Márquez (1997) y la degradación del suelo, el agua de las lluvias no es suficientemente captada por los suelos ni por las raíces de los árboles y se producen escurrimientos que llegan a dar a la ciudad y causan inundaciones.

En el Desierto de los Leones el factor más influyente también es la temperatura máxima tanto en primavera como en verano, y debido a la orografía de este parque, el agua de las precipitaciones no es un factor tan relevante como lo es en el Ajusco, ya que el DDLL es un poco más plano y con menos cañadas y barrancos cerca de los sitios donde hay pinos, por lo que el aumento de las temperaturas máximas es lo que provoca que los árboles detengan su crecimiento.

CONABIO y CONAFOR reportan que los pinos se encuentran máximo a una altura de 3100 msnm, pero en campo, se encontraron a más de 3200 m, lo cual es un primer indicio de que las especies están buscando altitudes donde las temperaturas sigan siendo las óptimas para su desarrollo (que no pasen de 35°C), y eventualmente no tendrán espacio a cual distribuirse.

## XI. CONCLUSIONES

Los cambios en los patrones de la temperatura y las precipitaciones si expresan el fenómeno del Cambio Climático en la ZMVM (Fig. 2) y los pinos del Ajusco son más sensibles a la disponibilidad de agua en primavera y a las temperaturas máximas en primavera y verano; mientras que los pinos del Desierto de los Leones son más sensibles a las temperaturas máximas en primavera y verano.

Los anchos de los anillos de crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus teocote* reflejan los efectos del cambio climático en sus patrones de crecimiento y sirven para poder identificar eventos climáticos no registrados como sequías o incluso El Niño o La Niña

Se requiere realizar una gran cantidad de estudios sobre nuestros bosques templados de altura y sobre las capacidades fisiológicas de las especies de árboles que ahí habitan, ya que no se han estudiado y no se ha generado la información necesaria para conservarlos y utilizarlos de manera sustentable y que beneficie a la Ciudad de México.

El Cambio Climático es un problema que debe ser abordado con mucho interés, ya que puede acabar con nuestros bosques progresivamente, y se tienen que atender con medidas específicas para poder atenuar sus efectos.

Los bosques de pinos son parte de la riqueza natural de la Ciudad y se tienen que cuidar y vigilar; se deben realizar programas eficientes de reforestación y silvicultura.

## XII. REFERENCIAS

### Bibliografía

- Bernal-Salazar, S. & Terrazas Salgado, T. (2000). *Influencia Climática sobre la Variación radial de Caracteres Anatómicos de madera en Abies religiosa*. Colegio de Posgraduados, México. *Madera y Bosques* 2000 6(1): 73 – 86.
- Biondi, F. (2001). *A 400-Year Tree-ring Chronology from the Tropical Treeline of North America*. AMBO: A Journal of the Human Environment, University of Nevada, Reno.
- Calva-Vázquez, G., Isla de Bauer, M. de L., Padilla-Gordon, H., Vargas-Hernández, J. J., & Velázquez-Martínez, A. (2006). *La Corteza Arbórea como Biomonitor del Depósito Ácido en la Cuenca de México*. *Rev. Ciencia Forestal en México*. Vol. 31, Num. 100., pp 80.
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Springer-Science+Business Media, B. V.
- Creus, J. & Puigdefábregas, J. (1976). *Climatología histórica y Dendrocronología de Pinus uncinata Ramond*. Instituto de Estudios Pirenaicos y Centro Pirenaico de Biología Experimental. España.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and Climate*. Laboratory of tree-ring research, University of Arizona. U.S.A., pp 1-3.
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Návar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O. & Jiménez, J. (2005). *Tree-rings and Climate Relationships for Douglas-fir Chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681 – 2001 rain reconstruction*. Elsevier B. V., *Forest Ecology and Management* 213: 39 – 53.
- Gutiérrez, E. (2009). *La dendrocronología: métodos y aplicaciones*. En “*Arqueología náutica mediterránea*“X. Nieto i M.A. Cau (eds.). Monografies del CASC. Generalitat de Catalunya. pp. 309-322.

- Gutiérrez de MacGregor, M. T. (1995). *La Ciudad de México y la Transformación del Medio Ambiente*. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, no 15, pp. 383-391.
- Hair Jr., J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. & Black, W. C. (1995). *Multivariate Data Analysis*. 4ª Edición. Prentice Hall, New Jersey USA, pp 78.
- Hocker Jr., H. W. (1984). *Introducción a la Biología Forestal*. AGT Editor, S. A., México, D. F. pp. 59-89.
- Jáuregui-Ostos, E. (1995). *Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización*. Departamento de Meteorología General, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Investigaciones Geográficas Boletín, núm. 31, México.
- Jáuregui-Ostos, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Instituto de Geografía, UNAM. México, pp. 31-46.
- Jáuregui-Ostos, E. (2004). *Impacto del uso de suelo en el clima de la Ciudad de México*. Investigaciones Geográficas (MX), núm. 55, Instituto de Geografía. México, pp. 46-60.
- Manrique-Menendez, E. & Fernández-Cancio, A. (1995). *El Papel de la Dendroclimatología en el Estudio del Cambio Climático Actual*. España, Madrid. Cuadernos de la S.E.C.F., N.º 2, pp. 21-34
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants*. School of Natural Resources. University of Missouri, U.S.A., 3º edición.
- Poveda, G. & Mesa, O. J. (1996). *Las Fases Extremas del Fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su Influencia sobre la Hidrología de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XI, Núm. 1, pags. 21 – 37.
- Ribas-Matamoros, M. (2006). *Dendroecología de Pinus halepensis Mill. En el este de la Península Ibérica e Islas Baleares: Sensibilidad y Grado de adaptación a las condiciones climáticas*. Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona.

- Salmén, L. (2004). *Micromechanical understanding of the cell-wall structure*. Plant biology and pathology. C. R. Biologies 327, pp. 873-880.
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree Rings: Basics and Applications. III Tree ring growth and the site: Reaction of species to climate and site*. Academic Publishers, Dordrecht, Holland, pp. 106-107.
- Schweingruber, F. H. (2007). *Wood Structure and Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. State University of New York, College of Environment Science and Forestry, pp. 85, 101.
- Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) del Gobierno del Distrito Federal (2014). *Estrategia local de Acción Climática, Ciudad de México 2014-2020: La Ciudad de México en la actualidad. Climatología*. México, DF, pp. 58-60.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to Tree-ring Dating*. The University of Arizona Press, Tucson, USA. pp. 31-46.
- Vargas-Márquez, F. (1997). *Parques Nacionales de México. Volumen II: Zonas Norte y Sur, Distrito Federal*. México, D.F., pp 11-43
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., García, C. V., Montes-González, L. E., & Selem, L. V. (2009). *Muestreo Dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, Dgo. pp. 3-17, 35.
- Wallén, C. C. (1955). *Some Characteristics of Precipitation in Mexico*. Geografiska Annaler Vol. 37, pp. 51-85.

#### **Webgrafía.**

- Ficha Biológica de *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. CONAFOR. Recuperada de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/983Pinus%20teocote.pdf>

- Ficha Biológica de *Pinus patula* Schl. et Cham. CONAFOR. Recuperada de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus%20patula.pdf>
- Fritts, H. C. (1971). *Dendroclimatology and dendroecology*. Cambridge University Press, Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90057-3)
- Innes, J. L. & Cook, E. R. (1989). *Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of Pollution on tree growth*. Canadian Journal of Forest Research. Descargado de: <https://www.researchgate.net/publication/237869275>
- Martínez-López, B., Quintanar, A. I., Cabos-Narvaez, W.D., Gay-García, C., & Sein, D. V. (2018). *Nonlinear Trends and Nonstationary Oscillations as Extracted From Anual Accumulated Precipitation at Mexico City*. *Earth and Space Science*, 5. <https://doi.org/10.1029/2018EA000395>
- Miina, J. (2000). *Dependence of Tree-ring, Earlywood and Latewood Indices of Scots pine and Norway spruce on Climate Factors in Eastern Finland*. Faculty of Forestry, University of Joensuu, Finalnd. ELSEVIER, Ecological Modeling, Vol. 132.
- Rahman, M., Islam, M., Wernicke, J. & Bräuning, A. (2018). *Changes in Sensitivity of Tree-ring Widths to Climate in a Tropical Moist Forest Tree in Bangladesh*. *Forests* 2018, 9, 761, [www.mdpi.com/journal/forests](http://www.mdpi.com/journal/forests).
- Secretaria de Medio Ambiente (SEDEMA) del Gobierno del Distrito Federal (2013). *Primer Informe de Trabajo, Capítulo 3: Suelo de Conservación y Biodiversidad*. Recuperado de: <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/images/archivos/noticias/primer-informe-sedema/>
- Secretaria de Medio Ambiente (SEDEMA) del Gobierno del Distrito Federal (2016). *Suelo de Conservación*. México, D.F. Recuperado de: [http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro\\_Suelo\\_de\\_Conservacion.pdf](http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf)

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) del Ministerio del Ambiente (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú: Registro histórico*. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/fenomenodelnino/el-nino-en-el-peru-y-sus-caracteristicas/registro-historico-de-el-nino/>
- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Las Regiones Climáticas de México: Región 5. Centro*. Temas Selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM, pp. 93-97.





Figura 36.



Figura 37.



Figura 38.



Figura 39.

Figura 36. Rodal de pinos muestreados en el Desierto de los Leones.

Figura 37. Ejemplar de *Pinus patula* en el parque Ajusco.

Figura 38. Rodal de pinos en el parque Ajusco.

Figura 39. Extracción de núcleo de un pino en el Ajusco.

Fotografías tomadas entre Septiembre 2017 y Marzo 2018 por M. en C. Germán Calva Vázquez.