



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

---

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

Reconstrucción histórica de la precipitación para Bocoyna, Chihuahua  
a través de anillos de crecimiento de *Juniperus deppeana* (Steud.) y  
*Pseudotsuga menziesii* (Mirb. Franco)

### TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

IVÁN MANUEL MOLINA PÉREZ

Bajo la supervisión de: JULIÁN CERANO PAREDES, DOCTOR  
IGNACIO SÁNCHEZ COHEN, DOCTOR



DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Bermejillo, Durango, Mayo 2018

**Reconstrucción histórica de la precipitación para Bocoyna, Chihuahua a través de anillos de crecimiento de *Juniperus deppeana* (Steud.) y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb. Franco)**

Tesis realizada por **Iván Manuel Molina Pérez** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

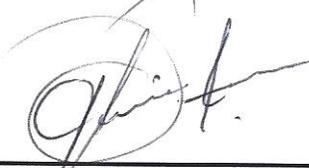
CO-DIRECTOR:



---

Dr. IGNACIO SANCHEZ COHEN

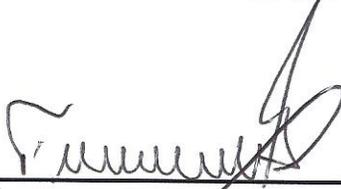
CO-DIRECTOR:



---

Dr. JULIÁN CERANO PAREDES

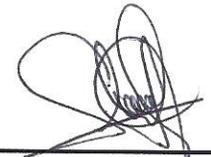
ASESOR:



---

Dr. FABIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

ASESOR:



---

Dr. GUILLERMO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

## RECONOCIMIENTO

La presente tesis, forma parte del proyecto **“Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México”** registro Conafor-2014, C01-234547.

## Índice

I	LISTA DE CUADROS .....	vii
II	LISTA DE FIGURAS .....	viii
III	DEDICATORIAS .....	x
IV	AGRADECIMIENTOS .....	xi
1	RESUMEN .....	xiii
2	ABSTRACT .....	xiv
3	INTRODUCCIÓN .....	1
4	OBJETIVOS .....	2
4.1	General .....	2
4.2	Objetivos específicos .....	2
5	HIPÓTESIS .....	2
6	REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
6.1	El cambio climático .....	3
6.2	La dendrocronología .....	4
6.3	Anillos de crecimiento .....	5
6.4	Principios de la dendrocronología .....	6
6.4.1	Principio del fechado cruzado .....	6
6.5	Aplicación y relación con otras ciencias .....	7
6.5.1	La Dendroclimatología .....	8
6.6	Dendroclimatología en el mundo .....	8
6.7	Estudios dendroclimáticos en México .....	9
6.8	<i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	10
6.9	<i>Juniperus deppeana</i> .....	11
7	MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
7.1	Localización del área de estudio .....	12

7.2	Método de campo .....	13
7.3	Preparación y análisis de muestras en el laboratorio.....	15
7.4	Análisis de datos.....	17
7.4.1	Análisis dendroclimático.....	17
8	CAPITULO I: <i>Juniperus deppeana</i> .....	19
8.1	Introducción .....	19
8.2	Materiales y métodos .....	20
8.2.1	Área de estudio.....	20
8.2.2	Muestreo de árboles .....	20
8.2.3	Fechado de muestras .....	22
8.2.4	Análisis de datos .....	22
8.3	Resultados .....	23
8.3.1	Función de respuesta.....	24
8.3.2	Reconstrucción de precipitación .....	26
8.3.3	Verificación y calibración.....	28
8.3.4	Precipitación reconstruida.....	29
8.4	Discusión .....	30
8.5	Conclusiones .....	35
9	CAPITULO II: <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco.....	36
9.1	Introducción .....	36
9.2	Materiales y métodos .....	37
9.2.1	Área de estudio.....	37
9.2.2	Muestreo de árboles .....	38
9.2.3	Fechado de muestras .....	38
9.2.4	Análisis de datos .....	39
9.3	Resultados .....	40
9.3.1	Función de respuesta.....	40
9.3.2	Reconstrucción de precipitación .....	42
9.3.3	Verificación y calibración.....	44
9.3.4	Precipitación reconstruida.....	45
9.4	Discusión .....	46
9.5	Conclusiones .....	48
10	VARIABILIDAD COMÚN ENTRE CRONOLOGÍAS .....	49

11	INFLUENCIA DEL ENSO EN LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA.....	51
12	CONCLUSIONES .....	54
13	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	56

## I LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas de estaciones meteorológicas .....	22
Cuadro 2. Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno–primavera <i>J. deppeana</i> .....	28
Cuadro 3. Análisis de Varianza del modelo de reconstrucción de <i>J. deppena</i> ...	28
Cuadro 4. Comparación de parámetros estadísticos dendrocronológicos entre la cronología de <i>J. deppeana</i> y cronologías de otras especies.....	32
Cuadro 5. Coordenadas de las estaciones meteorológicas.....	39
Cuadro 6. Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno–primavera <i>P. menziesii</i> .....	44
Cuadro 7. Análisis de Varianza del modelo de reconstrucción <i>P. menziesii</i> .....	44

## II LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principio del fechado cruzado .....	7
Figura 2. Distribución de <i>J. deppeana</i> y sus variedades.....	11
Figura 3. Ubicación geográfica de las áreas de estudio .....	12
Figura 4. a) Extracción de muestras con taladro de Pressler, b) núcleo de crecimiento, c) preparación de núcleo de crecimiento para su traslado al laboratorio, d) corte de secciones transversales con apoyo de motosierra, e) rotulado de muestra para su identificación en laboratorio y f) en playado de secciones para evitar daños durante el traslado al laboratorio. ....	14
Figura 5. Montado y pulido de muestras.....	15
Figura 6. Simbología empleada para definir un micro anillo, anillo perdido y un anillo falso. ....	16
Figura 7. Sistema de medición VELMEX. ....	16
Figura 8. Distribución espacial de los árboles de <i>J. deppeana</i> en el área de estudio. ....	20
Figura 9. Secciones transversales de <i>J. deppeana</i> que muestran las diferentes formas de crecimiento de la especie .....	21
Figura 10. Comparación de patrones de crecimiento anual entre arboles vivos y muertos de <i>J. deppeana</i> .....	23
Figura 11. Serie de índice de ancho de anillo total de <i>J. deppeana</i> .....	24
Figura 12. Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de <i>J. deppeana</i> y la precipitación mensual y acumulada.....	25
Figura 13. Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de <i>J. deppeana</i> y la temperatura mínima y máxima mensual.....	26

Figura 14. Correlación entre el índice de ancho de anillo y la precipitación acumulada enero –julio. ....	27
Figura 15. Verificación y calibración del modelo de regresión .....	29
Figura 16. Reconstrucción de la variabilidad de la precipitación enero -julio....	30
Figura 17. Distribución de <i>P. menziesii</i> muestreado en área de estudio. ....	37
Figura 18. Muestreo de <i>P. menziesii</i> con taladro de Pressler.....	38
Figura 19. Serie de índice de ancho de anillo de 357 años .....	40
Figura 20. Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de <i>P. menziesii</i> y la precipitación observada.....	41
Figura 21. Función de respuesta entre el índice de ancho y temperaturas (mínima y máxima).....	42
Figura 22. Relación entre índice de ancho de anillo de madera temprana de <i>P. menziesii</i> y precipitación estacional enero-mayo.....	43
Figura 23. Verificación y calibración del modelo de regresión .....	45
Figura 24. Reconstrucción invierno primavera para los últimos 357 años .....	46
Figura 25. Variabilidad común entre la reconstrucción de <i>P. menziesii</i> y la reconstrucción de <i>J. deppeana</i> . ....	50
Figura 26. a) Relación entre precipitación reconstruida para Bocoyna, Chihuahua y los índices NIÑO 3 SST. ....	52

### **III DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo de tesis a mi familia que siempre estuvo conmigo en todas las decisiones de mi vida, en mi corazón y mi alma:

#### **A mis queridos PADRES**

Por su extraordinario amor, trabajo, sacrificio, por sus valiosos consejos y comprensión a lo largo del trayecto de mi vida, el cual no es más que un largo camino, que apenas comienzo a recorrer. Pero de todo corazón les repito, ha sido un privilegio ser su hijo.

#### **A mi ESPOSA**

Tu ayuda ha sido fundamental, has estado conmigo en todo momento brindándome tu compañía, amistad, cariño, confianza, paciencia, por tu apoyo incondicional para seguir adelante y porque constantemente eres mi inspiración  
TE AMO.

#### **A mi HIJA**

Por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más. Tu afecto y tu cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti. Aun a tu corta edad me enseñaste a disfrutar la vida. Fuiste mi motivación más grande para este capítulo en nuestras vidas.

## **IV AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

En primera instancia al **CONACYT**, por todo el apoyo otorgado para realizar mis estudios de postgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial a la **Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas**, por haber podido realizar mis estudios de postgrado en esta Institución.

Al **Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP**. Lugar donde fue desarrollado en su totalidad este estudio.

Al **Dr. Julián Cerano Paredes** por aceptarme para emprender este proyecto y brindarme un espacio dentro del Laboratorio de Dendrocronología, por su amistad, confianza, apoyo incondicional, su excelente asesoría, paciencia, también la gran disponibilidad para realizar el presente estudio y las enseñanzas que me proporcionó en el ámbito de dendrocronología, además, que el trabajo fuera siempre agradable y un constante aprender.

A mí director de tesis **Dr. Ignacio Sánchez Cohen** y mis asesores **Dr. Fabián García González** y **Dr. Guillermo Sánchez Martínez** por su apoyo, confianza y tiempo otorgado.

**M.C. Rosalinda Cervantes Martínez** por su excelente disposición a ayudarme en todo momento, su amplia experiencia y grandiosa asesoría.

**M.C. Gerardo Esquivel Arriaga** por su incalculable ayuda en el trabajo de campo por su colaboración en la elaboración de los mapas y siempre conté con su apoyo incondicional y su amistad.

**Al Señor Luis Javier Sifuentes y Señor Luis Enrique Montes** gracias por sus consejos, compañía, amistad y por las enseñanzas proporcionadas.

# 1 RESUMEN

El análisis de la variabilidad climática en una escala de tiempo de varios siglos, permite analizar tendencias y recurrencia de eventos extremos. Sin embargo, para el norte de México no existe información climática observada mayor a 60 años, lo cual limita este análisis. El desarrollo de series paleoclimáticas representa una alternativa para reconstruir variables climáticas en una escala de tiempo extensa. El objetivo de esta investigación fue reconstruir la variabilidad climática a través de anillos de crecimiento de árboles para la región de Bocoyna, Chihuahua. Se recolectó un total 51 muestras de 21 árboles de *Juniperus deppeana* (Steud.) y 102 muestras de 35 árboles de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Las muestras se procesaron, analizaron y fecharon con base en técnicas dendrocronológicas estándar. Se determinó que el crecimiento anual de estas especies está influenciado de manera significativa por la precipitación invierno-primavera, así, para *J. deppeana* su crecimiento es influenciado por la lluvia estacional enero-julio ( $r = 0.71$ ;  $p < 0.001$ ) y para *P. menziesii* por la lluvia enero-mayo ( $r = 0.73$ ;  $p < 0.001$ ). Derivado de esto, se logró reconstruir la variabilidad de la lluvia para los últimos 223 y 357 años, respectivamente. La reconstrucción con base en *J. deppeana* representa la primera serie dendroclimática en México. Se identificó una variabilidad similar entre la reconstrucción de *J. deppeana* y *P. menziesii* ( $p < 0.001$ ;  $r = 0.66$ ), esta última representa la especie más estudiada en México y está ampliamente documentado su excelente potencial dendrocronológico, lo cual valida el potencial de *J. deppeana* como proxy del clima. La precipitación reconstruida para esta región del norte del país, ha sido modulada de manera significativa ( $r = 0.56$ ;  $p < 0.01$ ) por el fenómeno climático ENSO durante los pasados tres siglos y medio con frecuencias de 1 a 4 años.

**Palabras clave:** Dendroclimatología, Chihuahua, *Juniperus deppeana*, *Pseudotsuga menziesii*, variabilidad climática, ENSO.

---

Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas,  
Universidad Autónoma Chapingo  
Autor: Iván Manuel Molina Pérez  
CoDirector de Tesis: Dr. Ignacio Sánchez Cohen  
CoDirector de Tesis: Dr. Julián Cerano Paredes

## 2 ABSTRACT

The analysis of climatic variability on a time scale of several centuries allows analyzing trends and recurrence of extreme events. However, for the north of Mexico there is no observed climatic information greater than 60 years, which limits this analysis. The development of paleoclimatic series represents an alternative to reconstruct climatic variables in an extensive time scale. The objective of this research was to reconstruct the climatic variability through tree growth-rings for the region of Bocoyna, Chihuahua. A total of 51 samples were collected from 21 trees of *Juniperus deppeana* (Steud.) and 102 samples from 35 trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. The samples were processed, analyzed and dated based on standard dendrochronological techniques. It was determined that the annual growth of these species is influenced significantly by the winter-spring precipitation; thus, for *J. deppeana* its growth is influenced by the January-July seasonal rain ( $r = 0.71$ ,  $p < 0.001$ ) and for *P. menziesii* by the January-May rain ( $r = 0.73$ ,  $p < 0.001$ ). From here, the variability of rainfall for the last 223 and 357 years, respectively, was reconstructed. The reconstruction based on *J. deppeana* represents the first dendroclimatic series in Mexico. A similar variability was identified between the reconstruction of *J. deppeana* and *P. menziesii* ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.66$ ); the latter is the most studied species in Mexico and its excellent dendrochronological potential has been widely documented, which validates the potential of *J. deppeana* as a climate proxy. The reconstructed precipitation for this region in northern Mexico has been modulated significantly ( $r = 0.56$ ;  $p < 0.01$ ) by the ENSO climatic phenomenon during the past three and a half centuries with frequencies of 1 to 4 years.

**Keywords:** Dendroclimatology, Chihuahua, *Juniperus deppeana*, *Pseudotsuga menziesii*, climatic variability, ENSO.

### 3 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los temas más relevantes en las ciencias ambientales es el estudio de la variabilidad climática atribuido al calentamiento global. Se están produciendo cambios en los patrones de precipitación y por consiguiente, la perturbación dentro de los ecosistemas. Se espera que esta tendencia sea más acelerada en un futuro cercano (Irby *et al.*, 2013).

El estudio de la variabilidad climática histórica es importante para entender las tendencias climáticas actuales. Comprender la variabilidad climática puede ayudar en la gestión de recursos, la restauración y conservación de ecosistemas. Sin embargo, la falta de registros climáticos observados extensos limita este análisis (Constante *et al.*, 2009). Los registros observados son demasiado cortos para examinar la variabilidad climática histórica (Cerano *et al.*, 2009).

Ante tales circunstancias, es necesario generar información climática extensa a través de registros proxy (Irby *et al.*, 2013). En los ecosistemas existen fuentes naturales que registran la variabilidad climática, tales como: anillos de crecimiento de árboles, capas de hielo, polen fósil, entre otros. Los anillos de crecimiento de árboles se han usado para realizar reconstrucciones dendroclimáticas en las comunidades forestales (Arreola *et al.*, 2010).

La Sierra Madre Occidental (SMO), posee uno de los bosques más extensos y diversos de coníferas que quedan en el mundo, y cuenta con 24 especies de *Pinus* (46% del total nacional) (Irby *et al.*, 2013). Este sistema montañoso se extiende desde el centro de México hasta el suroeste de los Estados Unidos (Fulé *et al.*, 2005). Además, alberga a especies amenazadas como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y en peligro de extinción como *Picea chihuahuana* Martínez (Fulé *et al.*, 2005). Estudios realizados para la preservación de estas dos especies, han identificado la región de Bocoyna como prioritaria para su distribución, siendo el lugar con la mayor probabilidad de permanencia en México, debido a las condiciones del área (Aguilar *et al.*, 2015; Ledig *et al.*, 2000; Mendoza *et al.*, 2015).

Los estudios dendroclimáticos se han enfocado a un número reducido de especies en Chihuahua (Cerano *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009). En la región de Bocoyna se carece de estudios dendroclimáticos, por lo tanto, existe la necesidad de realizar este tipo de estudios dada a la importancia ecológica de esta región. La zona presenta ecosistemas de bosques mixtos con especies de excelente potencial dendroclimático (*P. menziesii*), en peligro de extinción (*P. chihuahuana*) y especies longevas como *Juniperus deppeana* de la cual se desconoce su potencial dendroclimático. Estos sitios representan un gran potencial para estudios paleoclimáticos (Cerano *et al.*, 2009).

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 General

Reconstruir la variabilidad de la precipitación en el municipio de Bocoyna, Chihuahua a través de anillos de crecimiento.

### 4.2 Objetivos específicos

- Generar series dendrocronológicas con base en anillos de crecimiento de *P. menziesii* y *J. deppeana*.
- Determinar el potencial de *J. deppeana* para reconstruir series dendroclimáticas.
- Reconstruir la variabilidad de la precipitación para los últimos tres siglos.
- Analizar la influencia de ENSO en la variabilidad climática regional.

## 5 HIPÓTESIS

- ✓ Los crecimientos anuales de *J. deppeana* son sensibles a la variabilidad climática.
- ✓ Las especies de *J. deppeana* y *P. menziesii* registran una tendencia de baja frecuencia similar en los últimos dos siglos.

## 6 REVISIÓN DE LITERATURA

### 6.1 El cambio climático

El cambio climático se define como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables” (Herrán, 2012, p. 7).

El cambio climático es uno de los mayores retos que ha enfrentado la humanidad (Rivera *et al.*, 2010). Sus efectos están reflejándose y han sido evidenciados por numerosas investigaciones en todo el mundo; el incremento de las temperaturas oceánicas y atmosféricas, derretimiento de glaciares, el incremento del nivel del mar, entre otras (Sánchez, 2010).

El cambio climático se atribuye al efecto invernadero, el cual es un sistema natural que mantiene al planeta lo suficientemente caliente para permitir la vida. Se estima que sin el efecto invernadero la temperatura promedio del planeta sería de -18 °C. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) naturales incluyen: vapor de agua, dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, metano CH<sub>4</sub>, óxido nitroso N<sub>2</sub>O y ozono. Estos GEI eran balanceados por procesos naturales (por ejemplo, el mar y las plantas absorben CO<sub>2</sub>), manteniendo su concentración en la atmósfera. Sin embargo, en la actualidad algunos de los GEI se han incrementado por cuestiones antropogénicas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, alocarbones y hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>). De estos GEI, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas antropogénico más importante; tiene una vida media en la atmósfera de varios siglos y está asociado al aumento de la temperatura (Azuz, 2010).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) expresa que los niveles elevados de CO<sub>2</sub> son responsables del cambio en el clima desde mediados del siglo XX. Los niveles de CO<sub>2</sub> en los últimos 50 años se localizan muy por arriba de los niveles registrados en la historia del planeta. Este incremento se ha asociado en gran medida a la revolución industrial y el estilo de vida que el ser humano adoptó. En este lapso de tiempo, la humanidad ha conseguido perturbar indefinidamente el termostato natural del planeta. El cambio climático no está en camino, el clima ya cambió y va seguir cambiando (Sánchez, 2016). El IPCC reporta que la temperatura de la superficie terrestre ha aumentado  $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$  entre 1906 y 2005 (Tejeda & Rodríguez, 2007).

Para poder analizar mejor el cambio climático de una región debemos de entender la variabilidad del clima de los últimos siglos. Sin embargo, los registros disponibles para analizar las variaciones climáticas procedentes de satélites y estaciones meteorológicas son muy reducidos; en los mejores casos, se posee información para los últimos 70 años y los primeros años de registro no son confiables en muchos de los casos. Existen registros naturales que puede extender la variación del clima, tales como: anillos de crecimiento de árboles, capas de hielo, polen fósil, sedimentos marinos, entre otros. La dendrocronología es la ciencia que se encarga de estudiar los anillos de crecimiento de las especies arbóreas (Fritts, 1976). Los anillos de crecimiento permiten relacionar el crecimiento con variables climáticas, reconstruir el clima del pasado y generar indicadores de cambio climático (Gómez *et al.*, 2015; Klepac, 1976).

## **6.2 La dendrocronología**

La palabra dendrocronología proviene del griego: “dendros” que significa árbol, “cronos” tiempo y “logos” ciencia o conocimiento. La dendrocronología es la ciencia que se encarga del estudio y la datación de los anillos de crecimiento de los árboles a través del tiempo. Cada árbol registra los fenómenos naturales

que ocurren a su alrededor y la dendrocronología nos ayuda a interpretar dicha información para aplicarla a cuestiones ambientales e históricas (Fritts, 1976).

### **6.3 Anillos de crecimiento**

El crecimiento de los árboles, como cualquier proceso de crecimiento, no es continuo y se detiene en algún momento debido a la limitación impuesta por algún factor externo o interno, formándose los anillos de crecimiento (Gutiérrez, 2009). En las regiones donde las estaciones del año son muy marcadas, particularmente en climas templados y fríos, los árboles producen anillos de crecimiento anuales debido a las modificaciones temporales en el metabolismo del árbol, más propiamente por las variaciones de la producción y actividad del cambium, el cual es un tejido meristemático encargado del crecimiento lateral o secundario que está situado entre la corteza y el xilema, es el responsable de la formación de células de los tejidos conductores (xilema y floema) (Salisbury *et al.*, 1994). Los anillos de crecimiento de los árboles pueden registrar las condiciones climáticas que se registraron durante su formación, debido a que el crecimiento de la planta está influenciado por diversos factores ecológicos se pueden diferenciar patrones en el ancho y densidad (Grissino-Mayer, 1996).

Los anillos de crecimiento se observan como bandas circulares, que se distinguen por cambios en el ancho, espesor y coloración de la pared de las células que los conforman, en cada anillo se pueden distinguir dos zonas, una clara (madera temprana) y otra oscura (madera tardía). El patrón de crecimiento de los árboles se establece normalmente a partir de la identificación y recuento de la madera temprana y la tardía (Kaennel & Schweingruber, 1995).

En los árboles que habitan regiones con estacionalidad definida, la formación de la madera temprana se inicia en primavera donde los períodos de crecimiento más favorables dan lugar a que el cambium produzca elementos de mayor diámetro, caracterizado por poseer células xilemáticas más grandes y paredes celulares más finas: La madera tardía se forma en invierno por aquellos períodos de crecimiento menos favorables, las células se forman con

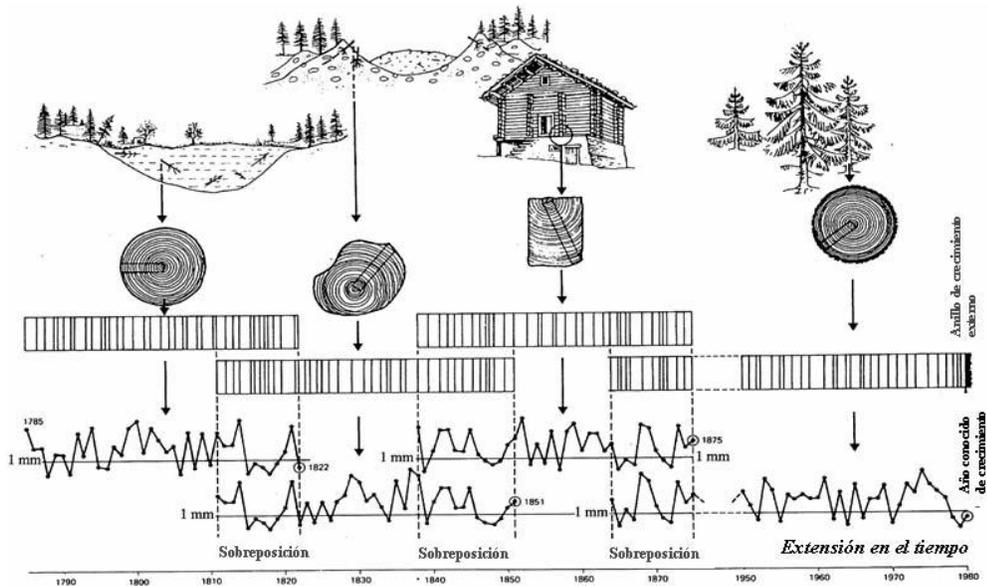
cavidades progresivamente más chicas y con paredes celulares más gruesas formando un tejido más denso. El contraste de tamaño y coloración entre la madera temprana y la madera tardía, permiten la identificación y la datación de los anillos (Gutiérrez, 2009).

#### **6.4 Principios de la dendrocronología**

Según Grissino-Mayer (1996), la dendrocronología se rige por un conjunto de siete principios o reglas bien establecidas, las cuales tienen sus raíces desde el año de 1785 con el principio de uniformidad y más recientemente en el año 1987 con el principio de la agregación de los factores ambientales. Algunos de estos principios se aplican específicamente para estudios dendrocronológicos, mientras que otros son comunes a muchas disciplinas. Los siete principios son a) uniformidad, b) factores limitantes, c) crecimiento agregado, d) amplitud ecológica, e) selección de sitio, f) replicación y g) fechado cruzado, este último se considera el más importante en la dendrocronología.

##### **6.4.1 Principio del fechado cruzado**

Este principio consiste en identificar el patrón de crecimientos similares en muestras de árboles para un área específica. Se da inicio con arbolado vivo, una vez que han sido definidos sus patrones de crecimiento, se continúa con arbolado muerto, arbolado enterrado y madera de ruinas. Todo el material que proviene de madera muerta permite extender en el tiempo las serie, punto donde radica la importancia del fechado cruzado (Stokes & Smiley, 1968) (Figura 1).



**Figura 1.** Principio del fechado cruzado para generar series dendrocronológicas.

## 6.5 Aplicación y relación con otras ciencias

Los estudios dendrocronológicos han alcanzado un elevado nivel de importancia y aplicación, esto se ha logrado al incorporar los conocimientos y las técnicas a diversas disciplinas científicas con las cuales tienen una estrecha conexión, entre las cuales destacan la anatomía y química de la madera, fisiología, genética forestal, silvicultura, climatología, hidrológica, estadística, etc.

Esta estrecha conexión con otras disciplinas y la datación exacta de los árboles por medio de la dendrocronología dio paso al desarrollo de nuevas ramas para el estudio de fenómenos ambientales. Dependiendo de los objetivos de las investigaciones existen una serie de aplicaciones como: dendroecología, estudio de la sucesión de bosque y el pasado de comunidades bióticas; dendrohidrología, para investigar y fechar cambios en la hidrología de un sitio, cambios del curso de un río, crecidas y represamiento de ríos; dendrogeomorfología, análisis temporal de los procesos geomórficos, movimientos del suelo, hundimientos, deslizamientos de tierra, erosión del suelo

a nivel de raíces; dendrosismología, los efectos de los sismos y terremotos evidenciados por daños físicos en el árbol; dendroglaciología, investiga y data la dinámica de los glaciares antes y ahora, cambios en el frente de los glaciares tanto por avance como por retracción; dendroarqueología, datación de maderas históricas empleadas para construcción; dendropirocronología, para fechar e investigar la dinámica de los incendios naturales y la dendroclimatología que representa una de las aplicaciones más ampliamente utilizadas, se refiere a un método indirecto o “proxy” para estudiar y reconstruir el clima pasado y presente (Schweingruber *et al.*, 1990; Tomazello *et al.*, 2000).

### **6.5.1 La Dendroclimatología**

Permite estudiar las relaciones que existen entre variables climáticas y los cambios en el crecimiento de los árboles para conocer cómo influyen en su desarrollo y así poder hacer una reconstrucción del clima. Por medio de la comparación estadística de la cronología obtenida (a través de una serie de anillos) y los datos climáticos modernos, se pueden desarrollar ecuaciones las cuales pueden ser utilizadas para construir el climática en épocas donde no se ha tenido registro alguno. Esta reconstrucción puede extender el registro del clima e incrementar su longitud lo suficientemente como para mejorar las estadísticas existentes sobre la variabilidad climática. Además, el pasado climático debería brindar a los científicos bases para estimar posibles modelos, sus frecuencias y su extensión geográfica (Fritts, 1976).

## **6.6 Dendroclimatología en el mundo**

En la actualidad existe un gran interés por parte de investigadores de los cinco continentes en generar una red de cronologías. La utilidad de esta red radica en la posibilidad de establecer mapas paleoclimáticos (Génova, 1988).

En Europa se ha trabajado con *Pinus uncinata* Mill. ex Mirb (Génova, 1988), también se han utilizado diferentes series de los generos *Picea*, *Pinus*, *Larix* y *Abies* para hacer reconstrucciones de temperatura (Esper *et al.*, 2002). Se han realizado estudios en Europa occidental desde 1750 d. C. (Schweingruber *et al.*,

1991) y Norteamérica occidental desde 1600 d. C (Briffa *et al.*, 1992), logrando desarrollar redes de cronologías de varias coníferas que crecen en sitios fríos y húmedos cerca de las líneas de árboles alpinas o boreales sensibles a las temperaturas de "verano" (abril a septiembre), que se han calibrado con datos meteorológicos que comprenden un período de 100 años (Schweingruber *et al.*, 1991).

En Turquía, una reconstrucción de precipitación mayo-julio con base en el crecimiento de *Juniperus excelsa* M. Bieb., que se logró extender de 1251-1998 (Touchan *et al.*, 2005). En España, se han realizado trabajos con *Juniperus thurifera* L., se analizó el comportamiento del crecimiento respecto a la edad y el clima (Rozas *et al.*, 2009). Estos resultados enfatizan la importancia de la investigación dendroclimatológica que puede proporcionar información climática a escala continental, representando un recurso potencial para climatólogos, biólogos e historiadores.

## **6.7 Estudios dendroclimáticos en México**

Las primeras referencias sobre estudios dendrocronológicos en México son aisladas. Schulman (1944), analizó especies de *Cupressus*, *Taxodium mucronatum* Ten y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham y muestras arqueológicas distribuidas en el centro del país, aunque sólo se logró desarrollar una cronología corta de *A. religiosa* al sur de la Ciudad de México. Scott (1966), desarrolló una cronología de 485 años con base en diferentes coníferas y logró fechar madera de las ruinas de Casas Grandes, Chihuahua. Naylor (1971), analizó el potencial dendrocronológico de cuatro especies de pinos Oaxaqueños sin éxito. Suzan y Franco (1981), trabajaron con *Pinus hartwegii* Lindl. en los volcanes del centro de México y lograron desarrollar una cronología de 200 años (1780-1980).

Sin embargo, en las últimas décadas la dendrocronología en México se ha convertido en una importante herramienta para los estudios en ecología y climatología. Uno de los lugares donde se ha potenciado al máximo estos

trabajos es el laboratorio de dendrocronología del CENID-RASPA INIFAP ubicado en Gómez Palacio, Durango. Se han desarrollado reconstrucciones históricas de precipitación, caudales, niveles de lagos y reconstrucciones de los regímenes históricos de incendios. Las principales especies que se han utilizado para la reconstrucción histórica de precipitación son: *P. menziesii*, *Pinus cembroides* Zucc., y *T. mucronatum*. La mayoría de los estudios dendroclimáticos en México se han desarrollado con base en *P. menziesii*, especie que ha permitido reconstruir la variabilidad climática por varios siglos en el norte del país (Cerano *et al.*, 2011; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009a). Sin embargo, en la actualidad México cuenta con muchas especies por explorar y determinar su potencial dendroclimático.

### **6.8 *Pseudotsuga menziesii***

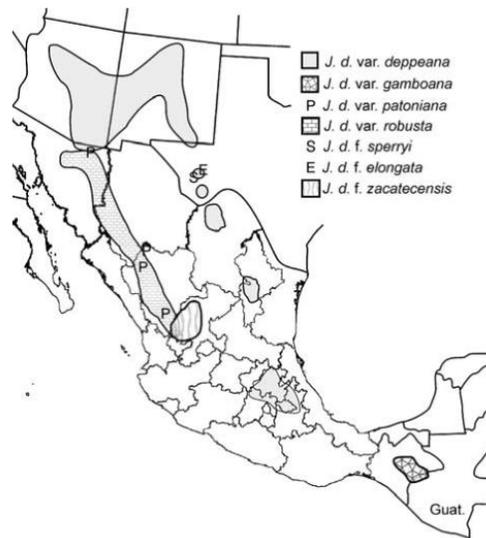
Árbol de altura de 12 a 40 m y diámetro entre 35 y 70 cm; copa compacta de forma piramidal en los ejemplares maduros y cónica cuando es joven. Corteza de color grisáceo en el exterior y rojizo anaranjado en su parte interna, de 15 a 25 mm de espesor, áspera y hendida, dividida en pequeñas placas irregulares. Cono de color oscuro rojizo con forma de óvalo de 5.5 a 7 cm, descansa sobre un pedúnculo delgado de 8 a 10 mm de largo (Flores *et al.*, Toledo, 2013). Es una especie característica de bosques templados que se encuentra presente en laderas con pendientes de 20 a 70% con exposición norte de mayor disponibilidad de humedad, en elevaciones de 2800 hasta los 3600 m.s.n.m. Se asocia con especies de *Pinus*, *Quercus* y *Abies*. Su distribución es principalmente en el oeste de EE.UU. y Canadá, pero México tiene poblaciones reducidas y fragmentadas en los estados de Hidalgo, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, Guanajuato, Puebla, Tlaxcala, Oaxaca y Veracruz (Villagómez *et al.*, 2015; Villagómez y Bello, 2015). Por ser una especie fragmentada y limitada superficialmente en México, se ha incluido como especie bajo protección especial en la NOM-059-SEMARNAT-2010, lo que prohíbe su aprovechamiento comercial (SEMARNAT, 2010).

Representa la conífera más longeva en México, se han localizado individuos vivos cercanos a los 500 años y madera muerta con edades que superan los 600 años (Cerano *et al.*, 2011a; Cleaveland *et al.*, 2003), razón por la cual es una de las especies más empleadas en estudios dendrocronológicos.

### 6.9 *Juniperus deppeana*

Esta especie es un árbol monoico que registra una altura entre 10 y 20 m, con fuste recto, corteza café oscuro y escamosa en capas rectangulares. Las hojas son simples escamiformes y sus frutos son conos sub-globosos de color rojizo-canela hasta rojizo-moreno con un diámetro de 8 a 11 mm, cada cono contiene de tres a seis semillas (Martínez *et al.*, 2007).

La especie de *J. deppeana* se localiza en áreas montañosas en elevaciones superiores a los 2000 msnm. Sus diferentes variedades hacen que tenga una distribución a lo largo de todo el país (Figura 2). *J. deppeana* var Robusta se distribuye en la Sierra Madre Occidental, los árboles tienen un eje central fuerte sin ramas laterales principales, corona piramidal y abiertos como en *Cupressus*, a menudo con 2 (3-4) troncos que se elevan al nivel del piso (Adams & Schwarzbach, 2006).

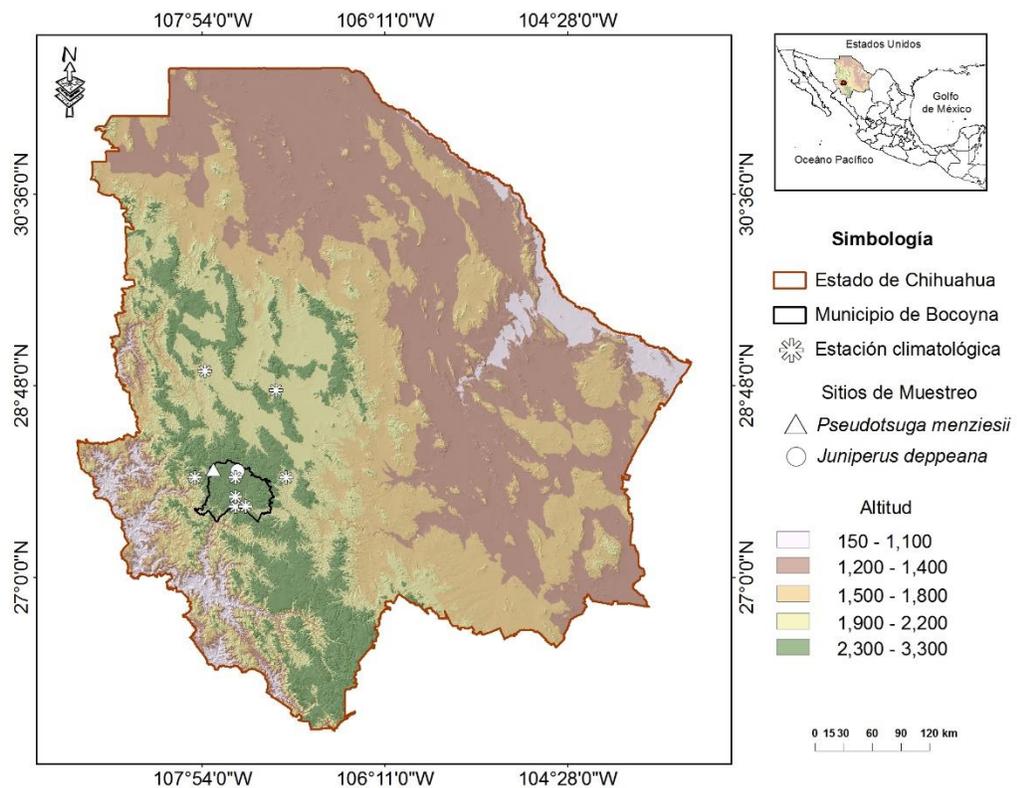


**Figura 2.** Distribución de *J. deppeana* y sus variedades.

## 7 MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Localización del área de estudio

Los sitios de estudio se ubican en los bosques de San Juanito, municipio de Bocoyna, Chihuahua (Figura 3), enclavados en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental. El sitio de *P. menziesii* registra una elevación promedio de 2413 msnm y *J. deppeana* de 2520 msnm. Los sitios se localizan entre las coordenadas 28° 0.837' N, 107° 47.462' O y 28° 0.132' N, 107° 32.780' O, respectivamente.



**Figura 3.** Ubicación geográfica de las áreas de estudio en Bocoyna, Chihuahua y las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático.

El suelo presente es de la clase regosol, se distingue por ser un suelo somero, de fertilidad variable, y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2017). El clima es del tipo C ( E ) (w<sub>2</sub>), semifrío subhúmedo con una temperatura media anual de 5 a 12 °C y una mínima del mes más frío de -3°C, la temperatura del mes más caliente es de 24°C, con una precipitación media anual de 800 mm (García, 2004).

## 7.2 Método de campo

El sistema de muestreo empleado en los dos sitios fue selectivo. Se obtuvieron los especímenes con características fenotípicas que mostraron cierta longevidad (generalmente con punta seca, tallo y corteza torcida en forma espiralada, copa no cónica). Así mismo, se muestrearon árboles jóvenes para facilitar el fechado de los años más recientes, los cuales generalmente son más pequeños y compactos en los árboles longevos, dificultando su proceso de fechado.

Los árboles más sensibles y que mejor captan la señal climática, son aquellos localizados en lugares secos (e.g. en laderas) donde el factor limitante es la disponibilidad de agua. Estos árboles dependen exclusivamente de la humedad almacenada en el perfil del suelo, por lo tanto, son más susceptibles a registrar la señal climática (Fritts, 1976). A este tipo de individuos se dirigió el muestreo.

Se seleccionaron dos especies, *P. menziesii* por su potencial para estudios dendrocronológicos (Cerano *et al.*, 2011a) y *J. deppeana* especie longeva y de gran distribución en la Sierra Madre Occidental y para la cual no existe ningún estudio dendroclimático previo, lo cual la hace de gran interés para analizar su potencial dendrocronológico.

Para *P. menziesii* se obtuvieron núcleos de crecimiento con taladro Pressler de 5 y 12 mm de diámetro y longitudes variables a una altura de 1.30 m (Figura 4a, b). Para *J. deppeana* se extrajeron secciones transversales con ayuda de una motosierra (Figura 4d). Ambas muestras se etiquetaron con la clave del sitio,

seguido con el número de árbol y la letra de la muestra (A, B o C) (Figura 4e). Las muestras tomadas con taladro de 12 mm de diámetro se envolvieron en papel periódico y los núcleos de crecimiento tomados con taladros de 5 mm de diámetro se colocaron en popotes de plástico con perforaciones para facilitar su aireación y evitar la formación de hongos (Figura 4c). Las secciones transversales de *J. deppeana* se envolvieron en plástico para evitar la fragmentación (Figura 4f). Finalmente, todas las muestras tomadas con taladro se depositaron en un tubo y las secciones transversales en cajas para su protección durante el traslado al Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP.



**Figura 4.** a) Extracción de muestras con taladro de Pressler, b) núcleo de crecimiento, c) preparación de núcleo de crecimiento para su traslado al laboratorio, d) corte de secciones trasversales con apoyo de motosierra, e) rotulado de muestra para su identificación en laboratorio y f) empaquetado de secciones para evitar daños durante el traslado al laboratorio.

En un formato anexo se registró la clave y el número de árbol, fecha de colecta, nombre del sitio, especie, diámetro, coordenadas, condición del árbol, elevación, entre otros datos fisiográficos y de vegetación del sitio. Cada árbol muestreado se geo posicionó para realizar el mapa correspondiente de su distribución (Cerano *et al.*, 2009).

### 7.3 Preparación y análisis de muestras en el laboratorio

Una vez con las muestras en el laboratorio, estas se secaron al aire libre bajo sombra, para evitar pudrición, la presencia de hongos y lograr un secado uniforme. Los núcleos de crecimiento se montaron en molduras de madera y se pegaron con resistol para dar una mayor firmeza a las muestras. Para el caso de las secciones, las muestras rotas y frágiles se pegaron y montaron en triplay. El procedimiento en ambos casos fue con la finalidad de facilitar su manejo. Las muestras de las dos especies se pulieron con diferentes granos de lijas, de la 60 hasta la 400, esto para visualizar mejor los anillos de crecimiento (Figura 5).

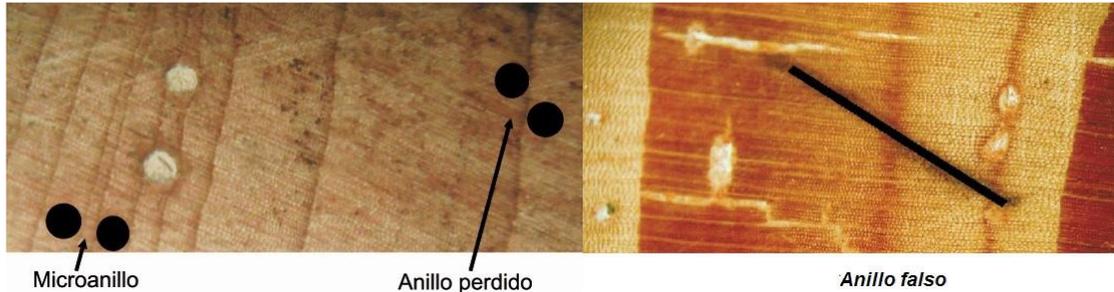


**Figura 5.** Montado y pulido de muestras.

Una vez pulidas las muestras, se procedió a contar los anillos con el apoyo de un estereoscópico binocular con resolución de 10x a 20x, se marcó cada década con un punto, cada mitad de siglo con dos puntos y cada siglo con tres puntos, técnica que facilita el proceso de conteo y medición (Stokes & Smiley, 1968).

La identificación de anillos falsos o anillos ausentes fue posible gracias al proceso de fechado cruzado, este consiste en comparar los crecimientos de las muestras provenientes de un mismo árbol y entre árboles del sitio, así como árboles de áreas cercanas, puesto que tienen una misma variabilidad de crecimiento. Lo anterior permite identificar patrones de crecimiento con el objeto de detectar anillos falsos o ausentes, definiendo así el año exacto de formación de cada crecimiento anual. Estas anomalías se marcaron de la siguiente forma;

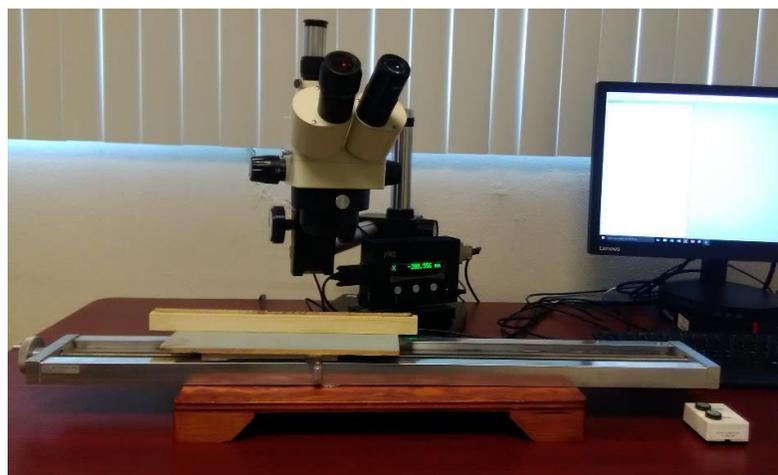
anillos falsos con una línea en diagonal; un micro anillo dos puntos horizontales, y un anillo ausente dos puntos en forma diagonal (Stokes & Smiley, 1968) (Figura 6).



**Figura 6.** Simbología empleada para definir un micro anillo, anillo perdido y un anillo falso.

El co-fechado se realizó con base en gráficos de crecimiento o “skeleton plots”, que permiten la comparación de los patrones de ancho de anillo e identificar la presencia de anillos falsos y ausentes en cada muestra. Estos problemas se corrigieron siguiendo el método descrito por Stokes & Smiley (1968).

El ancho de anillo total, madera temprana y tardía se midió con un sistema de medición VELMEX con platina deslizable y precisión de 0.001 mm, que utiliza el software MEASUREMENT-J2X para Windows (Figura 7).



**Figura 7.** Sistema de medición VELMEX.

## **7.4 Análisis de datos**

Para cada uno de los sitios se analizó la calidad de medición y fechado con el programa COFECHA (Holmes, 1983). El programa realiza correlaciones entre muestras y cada una de las muestras las compara con la serie maestra, esto mediante correlaciones en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años. Así mismo, da indicaciones de segmentos pobremente correlacionados con la serie maestra que podrían representar posibles problemas de fechado y/o de medición. Los errores identificados entre las series analizadas se corrigieron, se identificaron anillos omitidos por error o por estar ausentes en el radio analizado (anillos perdidos) y anillos falsos considerados como verdaderos. Se descartaron mediciones que mostraron muy poca correlación con el resto de las series.

Una vez fechadas las muestras de cada sitio, las tendencias biológicas no relacionadas con clima (competencia, liberación, edad) se removieron con el programa ARSTAN, este programa ajusta la mejor curva de crecimiento (una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición) y luego divide cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva, creando tres series de índices normalizados (cronologías estándar, residual y arstan) con media de 1.0 y varianza homogénea (Fritts, 1976).

### **7.4.1 Análisis dendroclimático**

Para observar la relación entre las cronologías y los datos climáticos, se analizaron 8 estaciones, considerando las más cercanas y con los registros más completos (1965-2015), los datos fueron obtenidos del programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2000).

Se generó una base de datos climáticos regional. Esta base de datos se correlacionó con las cronologías, lo anterior con el propósito de determinar qué

variable climática afecta la formación del anillo y qué periodo del año influye de manera significativa en el crecimiento de la especie.

Una vez determinada la variable y el período que más influye en el crecimiento de las especies, se generó un modelo de regresión lineal, para lo cual se empleó el programa STATISTICA versión 10 (Statsoft, 2011). El modelo se aplicó al período de datos observados, se validó mediante pruebas estadísticas de calibración y verificación entre datos observados y reconstruidos. La calibración en la primera mitad de datos busca examinar la relación entre ambas variables, y con la otra mitad se realizó la prueba de verificación que tiene como objetivo validar el modelo de la reconstrucción (Fritts, 1991). Validado estadísticamente el modelo, se aplicó para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de las cronologías de cada especie. Las reconstrucciones de precipitación generadas se compararon entre ellas y con otras series reconstruidas para el norte de México, lo cual permitió validar nuestras reconstrucciones y analizar la variabilidad climática común a diferentes escalas. Finalmente, se analizó la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en la variabilidad de la precipitación reconstruida para esta región del estado de Chihuahua. Se relacionó el índice Niño 3 SST (Cook, 2000) con la precipitación reconstruida. Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de ondeleta.

## 8 CAPITULO I: *Juniperus deppeana*

### 8.1 Introducción

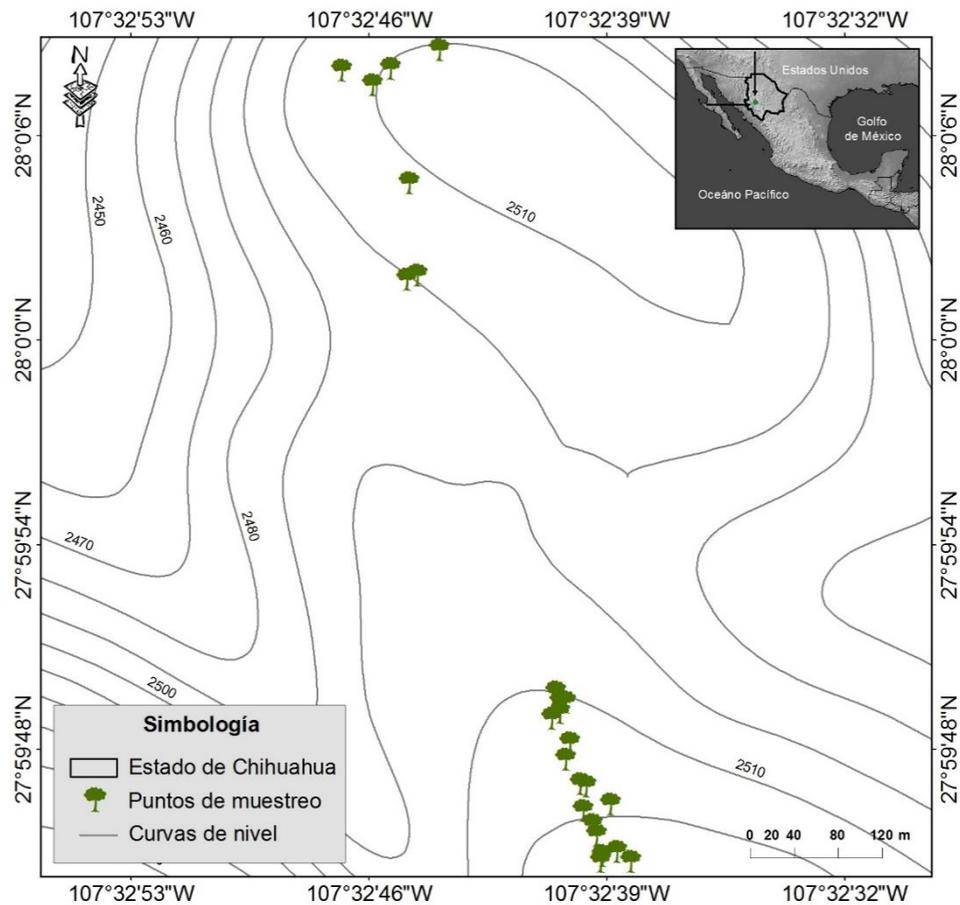
En México existen 12 especies de *Juniperus* y seis variedades. Es un género que dependiendo de la especie varía desde su distribución hasta su hábitat, existen especies las cuales son rastreras y otras arbóreas que alcanzan los 20 metros de altura. Unas con diámetros que apenas alcanzan centímetros y otras hasta más de un metro (Borja *et al.*, 2010).

La especie de *J. deppeana* se distribuye desde el Sur de Estados Unidos hasta el sur de México con siete variedades. *J. deppeana* var Robusta tiene una amplia distribución a lo largo de la Sierra Madre Occidental (Adams & Schwarzbach, 2006). Es tolerante a suelos pobres, se beneficia de la aparición periódica de incendios y es resistente a condiciones de sequía, se establece en laderas con pendientes en el rango de 10 a 70% (Zavala, 2003). Sin embargo, a pesar de su amplia distribución, se considera una especie de poca importancia económica por no ser maderable. Desde el punto de vista ecológico es de suma importancia dado que representa una especie primaria / secundaria (Valero *et al.*, 2004). Desafortunadamente no se le ha dado la importancia que merece. En la actualidad la investigación de esta especie es muy vaga, a tal grado que solo existen trabajos aislados del género, entre los que destacan descripciones de algunas especies (Zavala, 2003). Por tales circunstancias, se busca contribuir a generar mayor información ecológica sobre esta especie, el presente trabajo de investigación se plantea como objetivos, analizar la influencia de variables climáticas en el crecimiento anual de *J. deppeana* y determinar su potencial para reconstruir series climáticas.

## 8.2 Materiales y métodos

### 8.2.1 Área de estudio

El área de estudio de *J. deppeana* se ubica en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental en el municipio de Bocoyna, Chihuahua (Figura 8).

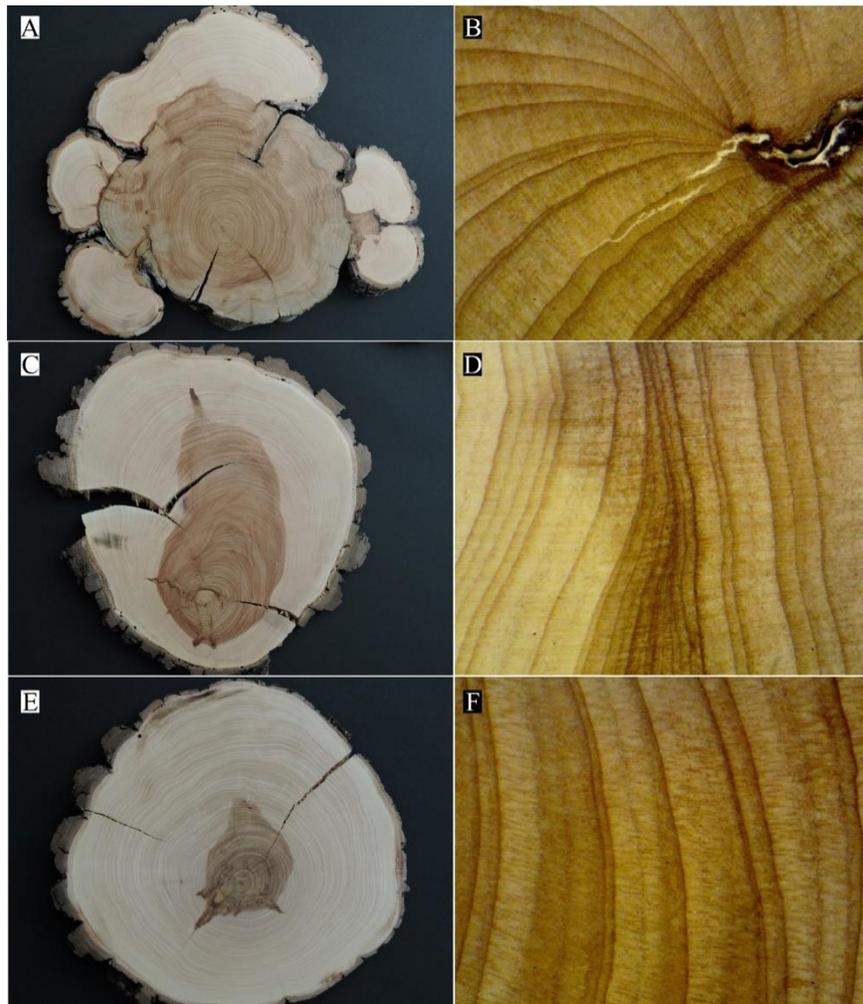


**Figura 8.** Distribución espacial de los árboles de *J. deppeana* en el área de estudio.

### 8.2.2 Muestreo de árboles

Se empleó un muestreo selectivo para la toma de muestras, esto permitió dos puntos importantes: 1) seleccionar los arboles con un crecimiento lo más concreto posible para facilitar el fechado y 2) identificar los individuos más longevos con el objetivo de generar series extensas (Figura 9). Con el apoyo de

una motosierra se logró coleccionar un total de 31 secciones transversales a la altura de 0.10 – 0.20 m del suelo, aproximadamente. La mayor cantidad de muestras se recolectó de árboles muertos y tocones (84%) y en menor proporción de árboles vivos (16%).



**Figura 9.** Secciones transversales de *J. deppeana* que muestran las diferentes formas de crecimiento de la especie, condiciones que dificultan el fechado en diferente grado. A y B) Árbol con daños que provocó una deformación de los crecimientos varios años posteriores al evento, C y D) indican la presencia de anillos perdidos, en determinada sección de la circunferencia no se observan todos los crecimiento por la formación de madera de tensión y compresión, y E y F) permite observar crecimientos concéntricos, este tipo de muestras son ideales para estudios dendroclimáticos porque tienen anillos uniformes y permiten detectar más fácilmente posibles problemas como anillos falsos y anillos perdidos.

### 8.2.3 Fechado de muestras

Para cada una de las secciones transversales se desarrollaron gráficos llamados Skeleton Plots, los cuales permiten comparar los patrones de crecimiento entre árboles. Así mismo, dos cronologías maestras una de *P. arizonica* (Cervantes *et al.*, En prensa) y otra *P. menziesii* (serie generada en este estudio) fueron utilizadas como referencia para determinar el año exacto de los crecimientos de *J. deppeana*.

### 8.2.4 Análisis de datos

La cronología de *J. deppeana* se correlacionó con variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima), datos climáticos promedios de 6 estaciones cercanas al área de estudio y con los registros más extensos (Cuadro 1).

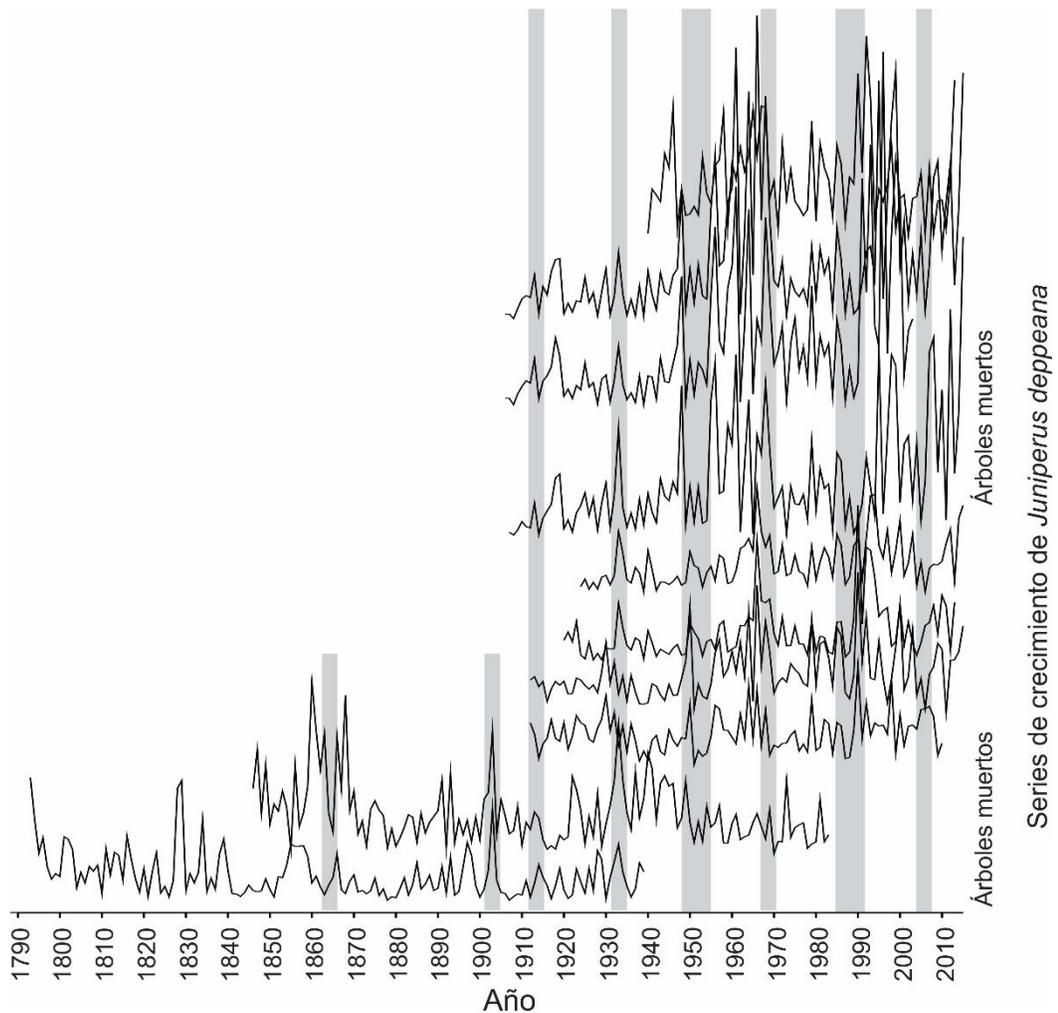
**Cuadro 1.** Coordenadas de estaciones meteorológicas

Estación	Latitud	Longitud	Datos observados	Datos utilizados
47141	27.938	-107.586		
46181	27.666	-107.586		
46182	27.666	-107.491	1950-2015	1965-2015
46501	27.757	-107.586		
47137	27.938	-107.966		
47146	27.938	-107.111		

Una vez analizada la respuesta climática, se desarrollo un modelo de regresión lineal con el software STATISTICA versión 10 (Statsoft, 2011), se corrió la prueba de calibración-verificación al modelo, y se aplicó para reconstruir la variabilidad de la precipitación estacional en la longitud total de la cronología.

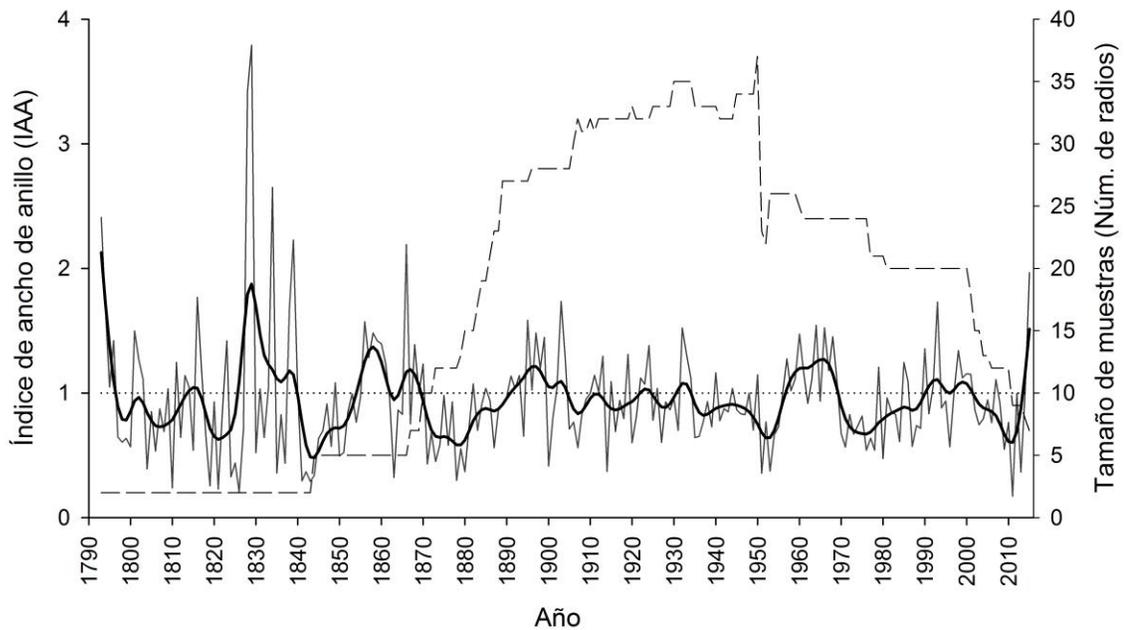
### 8.3 Resultados

De un total de 31 árboles muestreados (16% de árboles vivos y 84% de árboles muertos en pie y tocones), se logró fechar el 68 % de los individuos (21 árboles), con un total de 51 series de crecimiento. Se observó una variabilidad similar entre los patrones de crecimientos de los árboles (Figura 10).



**Figura 10.** Comparación de patrones de crecimiento anual entre arboles vivos y muertos de *J. deppeana*. Las líneas verticales en color gris indican los patrones de crecimiento similares entre árboles.

Se determinó una correlación entre series estadísticamente significativa  $r = 0.51$  ( $p < 0.01$ ), superando el parámetro establecido por COFECHA ( $r = 0.3281$ ;  $p < 0.01$ ) para considerar las series correctamente fechadas (Holmes, 1983). Finalmente, se generó una cronología de anillo total con una longitud de 223 años que comprende el periodo de 1793 a 2015 (Figura 11), y que representa la primera cronología de *J. deppeana* en México.

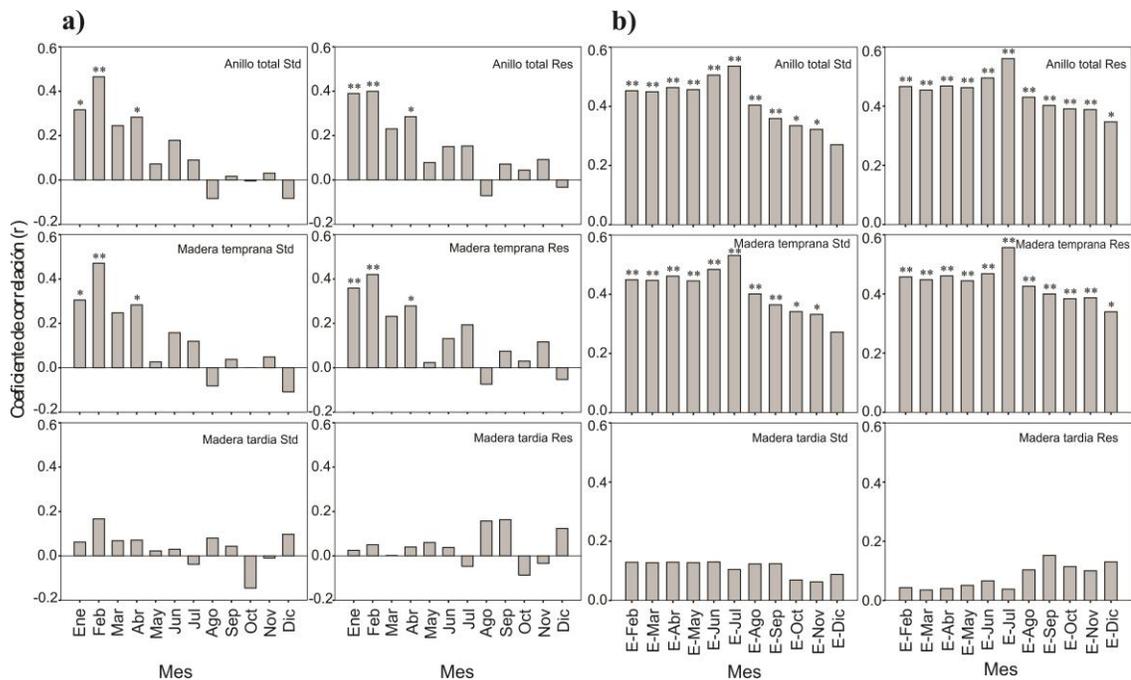


**Figura 11.** Serie de índice de ancho de anillo total de *J. deppeana* que comprende el período de 1793-2015 (223 años). La línea gris de fondo indica la variabilidad del índice de ancho de anillo anual, la línea en color negro es un spline de 10 años que permite observar eventos de baja frecuencia, y la línea punteada muestra el tamaño de muestra en cada uno de los segmentos de la serie.

### 8.3.1 Función de respuesta

Al relacionar las cronologías estándar y residual con la precipitación mensual regional del periodo de 1965-2015 (50 años), se determinó que los meses de enero, febrero y abril influyen de manera significativa ( $p < 0.01$ ) en el crecimiento del anillo total y la madera temprana; para el caso de la madera tardía se observa una relación positiva pero no significativa ( $p > 0.05$ ) (Figura 12 a). La

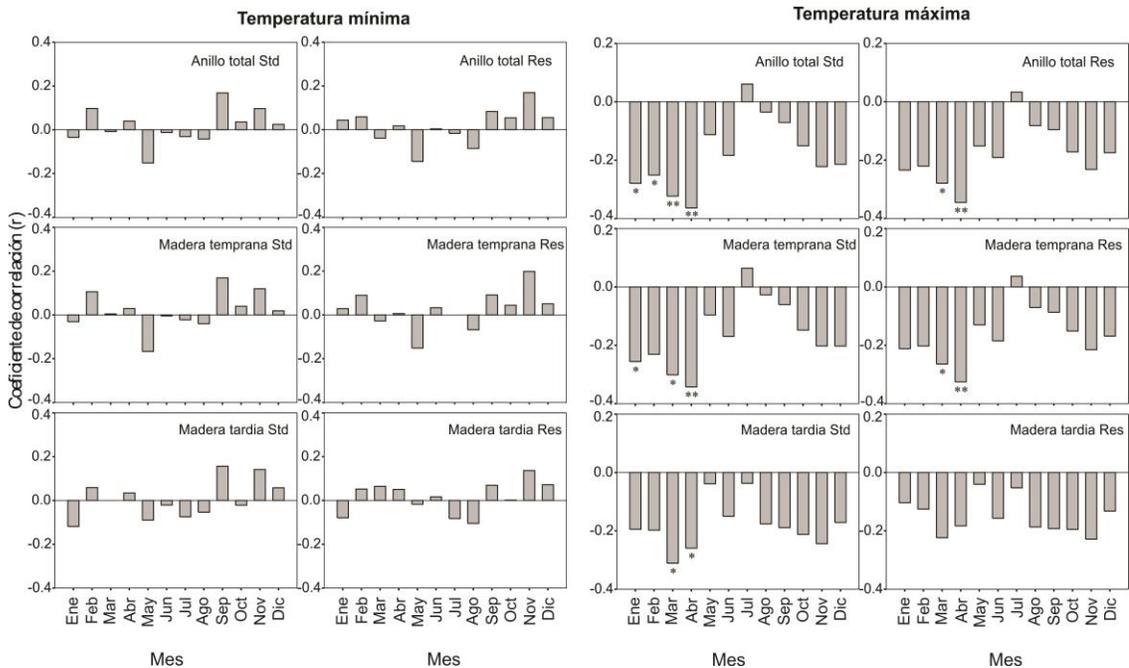
precipitación acumulada enero-noviembre influye de manera significativa ( $p < 0.05$ ) en el crecimiento total y de madera temprana al considerar la cronología estándar. Por el contrario, las cronologías residuales de anillo total y madera temprana responden de manera significativa ( $p < 0.05$ ) a la precipitación acumulada enero-diciembre (Figura 12b). Sin embargo, la correlación máxima se alcanzó entre la serie residual de anillo total y el periodo de lluvia acumulado enero-julio ( $r = 0.56$ ;  $p < 0.001$ ) (Figura 12b).



**Figura 12.** Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de *J. deppeana* y la precipitación mensual (a) y acumulada (b). Donde \* =  $P < 0,05$  y \*\* =  $P < 0,01$  indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

Para el caso de la variable temperatura, la temperatura mínima no mostró respuesta significativa ( $p > 0.05$ ) con relación al crecimiento, la mayor correlación positiva se observa para los meses de febrero, septiembre y noviembre tanto para el anillo total, madera temprana y tardía como para ambas cronologías (estándar y residual) (Figura 13). Sin embargo, la temperatura máxima indica

correlaciones negativas significativas ( $p < 0.05$ ) entre la cronología estándar de anillo total y madera temprana con el período enero-abril (Figura 13).



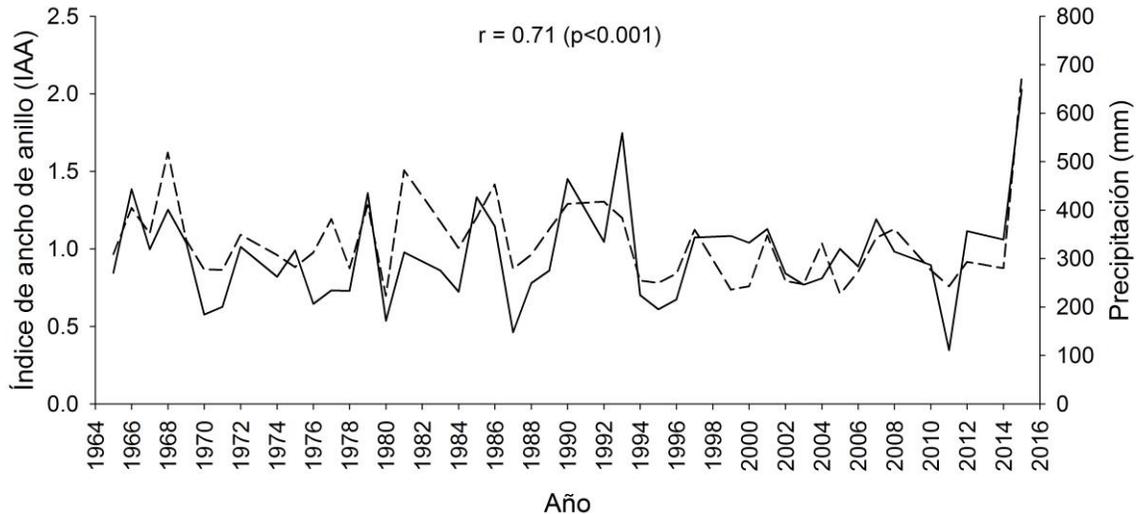
**Figura 13.** Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de *J. deppeana* y la temperatura mínima y máxima mensual. Donde \* =  $P < 0,05$  y \*\* =  $P < 0,01$  indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

Se determinó que la variable climática que más influye en el crecimiento de *J. deppeana* es la precipitación estacional enero-julio. Para nuestros objetivos de reconstrucción climática, se considera apropiado reconstruir la precipitación estacional enero–julio, por explicar la mayor la variabilidad.

### 8.3.2 Reconstrucción de precipitación

Al relacionar el índice de la cronología residual de anillo total y la precipitación estacional enero-julio del período 1965-2015, una vez eliminados los años 1973, 1982, 1991, 1998, 2009 y 2013 que registraron valores anormales, se observa una correlación significativa mayor de  $r = 0.71$  ( $p < 0.01$ ), lo que indica

potencial de *J. deppeana* para generar un modelo de regresión y reconstruir la precipitación en la longitud total de la cronología (Figura 14).



**Figura 14.** Correlación entre el índice de ancho de anillo (línea continua) y la precipitación acumulada enero –julio (línea punteada).

El modelo de regresión generado para el periodo 1965-2015 (Ecuación 1) presenta una  $r = 0.71$  ( $R^2 = 0.50$ ,  $p < 0.001$ ) (Cuadro 2 y 3) y fue el siguiente:

$$Y_t = 148.2451 + 192.0584 * X_t \quad (1)$$

Donde:

$Y_t$  = Valor de precipitación reconstruido enero-julio (mm) para un año en específico t (variable dependiente).

a = 148.2451 constante de regresión

b = 192.0584 constante de regresión

$X_t$  = Índice de anillo total para un año en específico t (variable independiente).

**Cuadro 2.** Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno–primavera *J. deppena*.

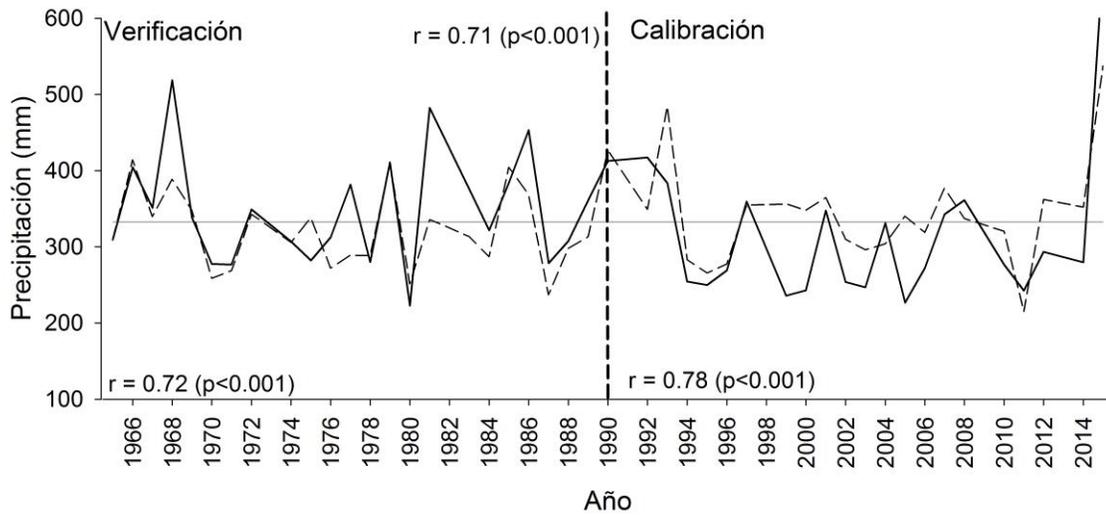
Periodo	R <sup>2</sup>	Coeficiente	Error estándar	Valor de t	Probabilidad
1965-2015	0.50	a148.245	29.560	5.015	0.001
		b192.058	29.262	6.563	0.001

**Cuadro 3.** Análisis de Varianza del modelo de reconstrucción de *J. deppena*.

Periodo	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Regresión	167006.5	1	167006.5	43.07	0.001
Residual	166707.9	43	3876.9		
Total	333714.4				

### 8.3.3 Verificación y calibración

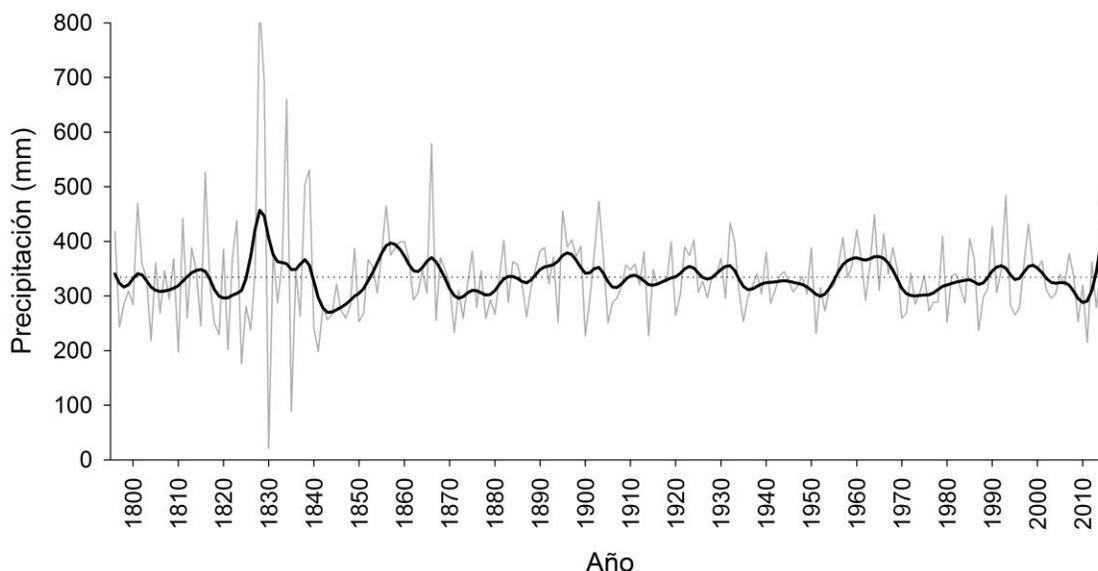
Para que un modelo de reconstrucción sea estadísticamente válido, es preciso desarrollar los procesos, uno de verificación y otro de calibración. La verificación presentó una correlación de  $r = 0.72$  ( $p < 0.001$ ), explica el 52% de la variabilidad de la precipitación. Mientras la calibración mostró una correlación de  $r = 0.78$  ( $p < 0.001$ ), explica el 60% de la variabilidad de la lluvia (Figura 15). Ambas pruebas tanto de verificación como de calibración pasaron la prueba de significancia ( $p < 0.05$ ), por lo tanto, el modelo de regresión lineal se considera aceptable para ser aplicado en la longitud total de la cronología.



**Figura 15.** Verificación y calibración del modelo de regresión. La línea continua muestra la precipitación observada del periodo enero-julio, mientras la línea punteada es la precipitación reconstruida del mismo periodo. La línea horizontal continua es la media.

### 8.3.4 Precipitación reconstruida

Se logró reconstruir la variabilidad de la precipitación estacional enero -julio para los últimos 223 años (1793-2015). La serie indica variabilidad de alta y baja frecuencia (Figura 16).



**Figura 16.** Reconstrucción de la variabilidad de la precipitación enero -julio para San Juanito, Bocoyna, Chihuahua. La línea de color gris de fondo indica la variabilidad anual de la precipitación; la línea de color negro representa un Spline de 10 años que permite observar eventos de baja frecuencia como sequías y período húmedos, y la línea punteada horizontal indica la precipitación promedio.

Se determinaron sequía que variaron en intensidad para los períodos 1802-1811, 1817-1824, 1840-1851, 1869-1881, 1904-1908, 1912-1918, 1934-1953, 1970-1988, 2002-2012. De igual manera, se reconstruyeron precipitaciones por arriba de la media para los períodos 1824-1839, 1853-1868, 1889-1902, 1919-1924, 1928-1933, 1955-1967, 1989-1994, 1996-2001.

#### 8.4 Discusión

Este trabajo representa el primer estudio que analiza el potencial dendroclimático de *J. deppeana* en México. Esta especie muestra patrones de crecimiento similares entre árboles. Los resultados de intercorrelación entre series ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.01$ ) fueron superiores a lo establecido por el programa COFECHA ( $r = 0.3281$ ,  $p < 0.01$ ) (Holmes, 1983). Una de las especies de *Juniperus* para la cual recientemente se analizó su potencial dendroclimático es *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tlálloc, Estado de México (Villanueva *et al.*, 2016), reportando una correlación entre series ( $r = 0.55$ ,  $p < 0.01$ ) superior

a la indicada por *J. deppeana*. Sin embargo, el número de muestras es menor comparado con las muestras fechadas de *J. deppeana*, 33 y 51 muestras, respectivamente. Por lo tanto, podemos deducir que si se redujera el número de muestras se podría alcanzar una correlación similar a la reportada para *J. monticola*. Respecto a la sensibilidad media y relación señal ruido, *J. deppeana* registra valores superiores que *J. monticola*, 0.439, 1.93 y 0.41, 1.23, respectivamente (Cuadro 4).

Los estudios dendroclimáticos utilizan entre 20 y 30 árboles para obtener una cronología: sin embargo, según el criterio del International Tree Ring Data Bank estableció en 15 el mínimo necesario para obtener una cronología fiable (Cook & Kairiukstis, 1990). En *J. deppeana* se muestrearon 31 árboles de los cuales se fecharon 21, superando el mínimo necesario para obtener una cronología fiable.

Los principales problemas de crecimiento identificados en *J. deppeana* que deben ser considerados en trabajos futuros para lograr mayor éxito en el fechado fueron: daños comunes en el tallo que provocan la deformación de los crecimientos, formación de bandas falsas de crecimiento y la presencia de anillos perdidos en determinadas secciones de la circunferencia, esto atribuido al crecimiento de madera de tensión y compresión (Figura 9), a lo cual se atribuye el haber logrado fechar únicamente el 68% de los individuos (21 árboles), con un total de 51 series de crecimiento. El éxito en el fechado de las muestras depende de las condiciones del sitio donde crecen los árboles y esto puede propiciar que el fechado varíe de un 43% a un 90% (Lara *et al.*, 1993; Neira, 1995; Villalba *et al.*, 1990). Los ejemplares que no co-fechan regularmente derivan de árboles cuyo desarrollo ha estado fuertemente influenciado por condiciones específicas del área (competencia, incendios y liberaciones) (Lara, 2000).

La cronología de *J. deppeana* presentó una correlación entre muestras superior a la reportada para otras especies con las cuales se ha reconstruido la variabilidad climática (Cuadro 4). Cerano *et al.* (2014) reporta una correlación

entre series de  $r=0.473$  ( $p<0.01$ ) para *A. religiosa*; Díaz *et al.* (2016) indica una correlación entre muestras de  $r= 0.463$  ( $p<0.01$ ) para *Pinus durangensis* Ehren y Villanueva *et al.*, (2015) señalan que *Hesperocyparis guadalupensis* (S. Watson) Bartel. Var. *guadalupensis* presenta una  $r= 0.389$  ( $p<0.01$ ). Únicamente especies como *P. menziesii*  $r=0.69$  (Villanueva *et al.*, 2014) y *P. cembroides*  $r=0.72$  (Constante *et al.*, 2009), que representa especies con excelente potencial para generar series dendroclimáticas registran valores de correlación entre muestras superior a los indicados para *J. deppeana*.

En cuanto a sensibilidad *J. deppeana* mostró mayor sensibilidad que *P. menziesii*, *P. durangensis*, *Pinus lumholtzii* Robins & Ferns, *P. cembroides*, *P. durangensis*, *H. guadalupensis* y *J. monticola* (Cuadro 4). Lo anterior indica que la especie se encuentra en un rango aceptable para ser empleada como proxy de la variabilidad climática en esta región del norte del país (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Comparación de parámetros estadísticos dendrocronológicos entre la cronología de *J. deppeana* y cronologías de otras especies.

Especie	<i>J. deppeana</i>	<i>P. menziesii</i>	<i>P. lumholtzii</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. durangensis</i>	<i>P. cooperi</i>	<i>J. monticola</i>
Periodo	Enero-Julio	Enero-Junio	Enero-Junio	Enero-Julio	Enero-Agosto		Temp media anual
Estado	Chihuahua	Coahuila	Durango	Coahuila	Durango	Durango	Edo. de México
N° de muestras	51	206	41	67	88		33
Total de años	223	302	294	410	232	111	264
Correlación	0.507	0.71	0.6	0.72	0.463	0.61	0.55
Sensibilidad	0.439		0.23	0.309	0.309	0.45	0.41
Citado		(Cerano <i>et al.</i> , 2011)	(Chávez <i>et al.</i> , 2017)	(Constante <i>et al.</i> , 2009)	(Díaz <i>et al.</i> , 2016)	(Pompa <i>et al.</i> , 2014)	(Villanueva <i>et al.</i> , 2016)

La especie de *J. deppeana* respondió de manera significativa ( $r= 0.70$ ,  $p<0.001$ ) a la precipitación estacional que comprende el periodo enero-julio, similar a otras especies ampliamente estudiadas como *P. cembroides* en Coahuila (Constante *et al.*, 2009) y *P. menziesii* en la Sierra Madre Occidental (Villanueva *et al.*, 2014) y Sierra Madre Oriental (Cerano *et al.*, 2011b). Una explicación a esta respuesta, se puede atribuir a que las lluvias en invierno suelen ser de baja intensidad favoreciendo la infiltración. Las temperaturas bajas reducen la evapotranspiración, el árbol acumula reservas para utilizarlas en la estación de crecimiento y, para antes del fin de verano, el crecimiento anual presenta un desarrollo de más del 60% (Fritts, 1976).

La temperatura mínima presenta correlaciones positivas, pero no significativas con el crecimiento, el período septiembre-diciembre representa el más importante. Lo anterior se puede atribuir que en septiembre empieza a bajar la temperatura progresivamente de 5 °C hasta -9°C en diciembre, provocando menos evaporación y mayor infiltración con las lluvias invernales, por consiguiente, mayor humedad aprovechable en el suelo para el árbol en la siguiente estación de crecimiento.

La temperatura máxima por el contrario responde de manera significativa ( $p<0.005$ ) aún que negativa al periodo enero-abril, representando la mayor correlación los meses de marzo y abril. Este comportamiento se atribuye a que en estos meses se registra el mayor incremento de temperatura y los valores más extremos (30 °C). A mayor temperatura en los primeros meses del año cuando las precipitaciones son escasas propician pérdida de humedad en el suelo por la evapotranspiración, reduciendo la humedad aprovechable para el árbol al inicio de la estación de crecimiento. De esta manera a mayor temperatura existe menor humedad. Así mismo, temperaturas por encima de 25 °C reducen drásticamente la apertura de estomas y por consiguiente una respuesta negativa en el crecimiento (Leverenz, 1981). Este mismo comportamiento se ha documentado para diferentes especies de pino en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango (Chávez *et al.*, 2017).

La precipitación reconstruida para el período enero -julio en los últimos 223 años registra períodos con disminuciones de precipitación para 1802-1811, 1817-1824, 1840-1851, 1904-1908, 1934-1955, 1970-1988 y 2002-2012. Así mismo, periodos con precipitaciones arriba de la media para 1824-1839, 1889-1902, 1919-1924, 1955-1967, 1989-1994 (Figura 16). Entre los eventos de sequía más severos sobresalen los períodos de 1802-1811 y 1817-1824 que se han documentado en una reconstrucción de precipitación en Cerro El Mohinora, Chihuahua (Cerano *et al.*, 2009).

La sequía de 1802-1811 se ha detectado en otras reconstrucciones paleoclimáticas en el norte, centro de México y Texas (Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 1998; Therrell *et al.*, 2002). Como resultado de la falta de lluvia se perdieron cosechas y el precio del maíz se incrementó, de tal manera que el descontento de la sociedad aumentaba. Este periodo de sequía es considerado como un factor más que contribuyó a la detonación de la Guerra de Independencia (Florescano & Swan, 1995).

La sequía reconstruida de 1840 a 1851 también afectó otras regiones de la Sierra Madre Occidental (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007) y de la Sierra Madre Oriental (Cerano, 2004; Cerano *et al.*, 2011b), reportada como una de las sequías más severas.

Las sequías reconstruidas para los periodos de 1817-1824 y de 1933-1955 también han sido documentados en trabajos paleoclimáticos para la región de San Dimas, Durango (Chávez *et al.*, 2017). Sin embargo, en San Dimas este último período se divide en dos 1935-1940 y 1950-1957, para la región de Bocoyna se identifica como un solo periodo de sequía, lo cual indica que la lluvia no alcanzo a rebasar la media para ningún año, representando una sequía más severa para esta región de Chihuahua.

La reconstrucción de series paleoclimáticas además de brindar información más extensa a la disponible de registros observados, permite analizar la sincronía de

eventos climáticos extremos entre diferentes regiones del país y analizar su variación en cuanto a extensión e intensidad.

## **8.5 Conclusiones**

Los parámetros de calidad del fechado y las cronologías generadas revelaron que *J. deppeana* tiene potencial para estudios dendrocronológicos. Registra una variabilidad común con cronologías de otras especies como *P. arizonica* y *P. menziesii*, confirmando su potencial dendrocronológico.

Los anillos de esta especie son sensibles a la precipitación invierno primavera (enero –julio), logrando generar una reconstrucción de la variabilidad de la lluvia estacional para los últimos 223 años (1793-2015).

La especie presenta problemas de crecimiento atribuidos a daños mecánicos, lo cual propicia la deformación de crecimientos; asimismo, la formación de anillos falsos y ausentes por la presencia común de madera de tensión y compresión. En posteriores estudios se recomienda trabajar únicamente con secciones transversales y considerar suficiente número de muestra para disminuir este problema.

La distribución de *J. deppeana* en sitios pobres y que no es una especie aprovechable de forma industrial, permite poder encontrar individuos longevos, situación que hace a esta especie atractiva para desarrollar una red de estudios dendroclimáticos a lo largo de la SMO.

## 9 CAPITULO II: *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

### 9.1 Introducción

*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco es una de las coníferas de mayor distribución geográfica en Norteamérica (Gartner *et al.*, 2002), se extiende desde Columbia Británica, Canadá, a lo largo de la costa del Pacífico hasta California, Estados Unidos (Domínguez *et al.*, 2004). En México se encuentra en el límite latitudinal de distribución, se desarrolla de manera dispersa en rodales aislados y fragmentados en superficies pequeñas de hábitats específicos; sobre todo, en la parte norte de la Sierra Madre Occidental, en menor proporción en la de la Sierra Madre Oriental, en el Eje Neo Volcánico Transversal y en el Estado de Oaxaca se localizan dos poblaciones (Ventura *et al.*, 2010). Lo restringido de la especie en términos de superficie ocupada y número de poblaciones existentes en México, ha propiciado que se incluya como especie bajo protección especial en la NOM-059-SEMARNAT-2010, lo que prohíbe su aprovechamiento forestal (SEMARNAT, 2010).

Debido a su estatus, se han encontrado especímenes longevos representando una especie idónea para la reconstrucción de series paleoclimáticas, su potencial dendroclimático se ha estudiado extensamente en diferentes regiones del mundo (Biondi, 2000; González, 2003). Las reconstrucciones hidroclimáticas utilizando *P. menziesii* han ido en aumento en las últimas dos décadas en México, siendo la especie más analizada. Sin embargo, aún es necesario ampliar el número de estudios con el fin de expandir la red dendrocronológica y poder elaborar un mapa paleoclimático más completo del norte de México. En la región de Bocoyna, Chihuahua, existen pequeñas pero importantes poblaciones de *P. menziesii* y se carece estudios dendroclimáticos. El presente trabajo de investigación se plantea como objetivos, generar series dendrocronológicas con

base en anillos de crecimiento de *P. menziesii* y reconstruir la variabilidad de la precipitación en el municipio de Bocoyna, Chihuahua. Con lo cual se busca incrementar la red de estudios fundamentados en esta especie.

## 9.2 Materiales y métodos

### 9.2.1 Área de estudio

El área de estudio de *P. menziesii* se ubica en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental en el municipio de Bocoyna, Chihuahua (Figura 17).

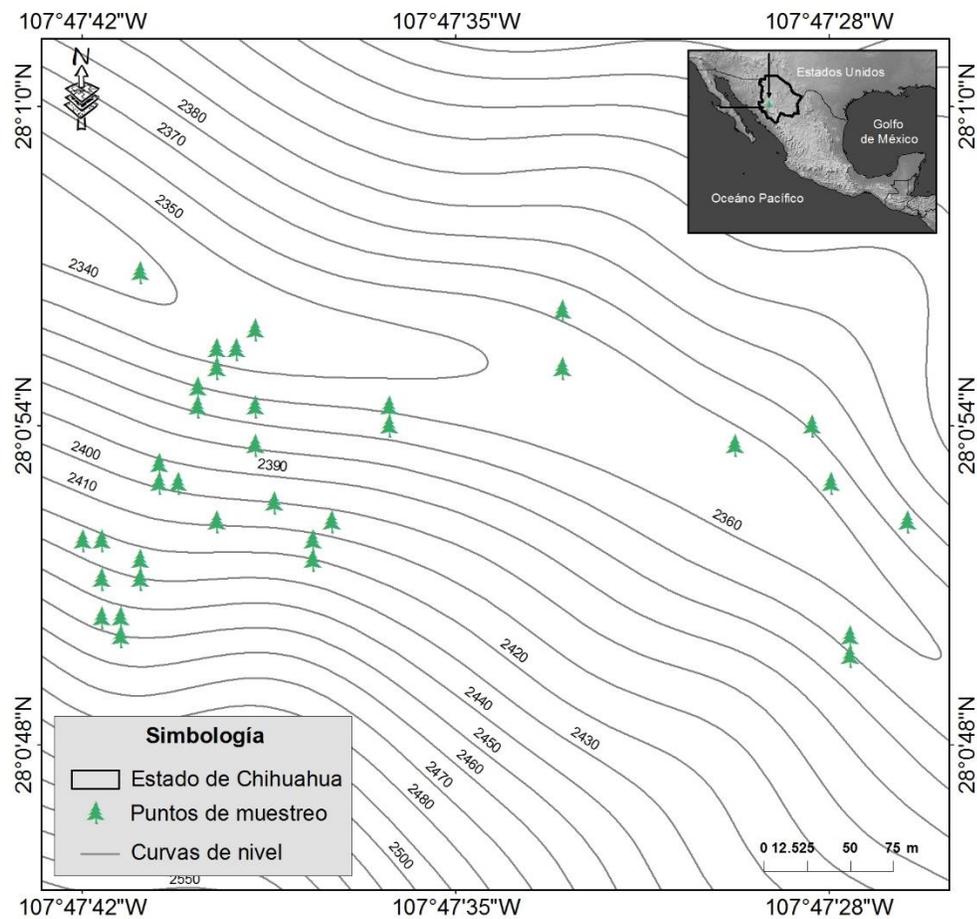


Figura 17. Distribución de *P. menziesii* muestreado en área de estudio.

### 9.2.2 Muestreo de árboles

Se muestrearon 35 árboles con ayuda del taladro Pressler de 5 y 12 mm de diámetro y diferentes longitudes a una altura de 1.30 m (Figura 18). Se obtuvieron de tres a cuatro núcleos de crecimiento por árbol.



**Figura 18.** Muestreo de *P. menziesii* con taladro de Pressler.

### 9.2.3 Fechado de muestras

Para cada una de las muestras se desarrollaron gráficos llamados Skeleton Plots, los cuales permiten comparar los patrones de crecimiento entre muestras y entre árboles. Así mismo, se comparó anillo por anillo entre muestras para discriminar falsos anillos e identificar anillos perdidos.

#### 9.2.4 Análisis de datos

La cronología de *P. menziesii* se correlacionó con las variables climáticas de precipitación, temperatura máxima y mínima, datos climáticos promedio de ocho estaciones (Cuadro 5), que comprenden registro de 1965 a 2015 (50 años). Los datos se obtuvieron del programa Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC) (IMTA, 2000).

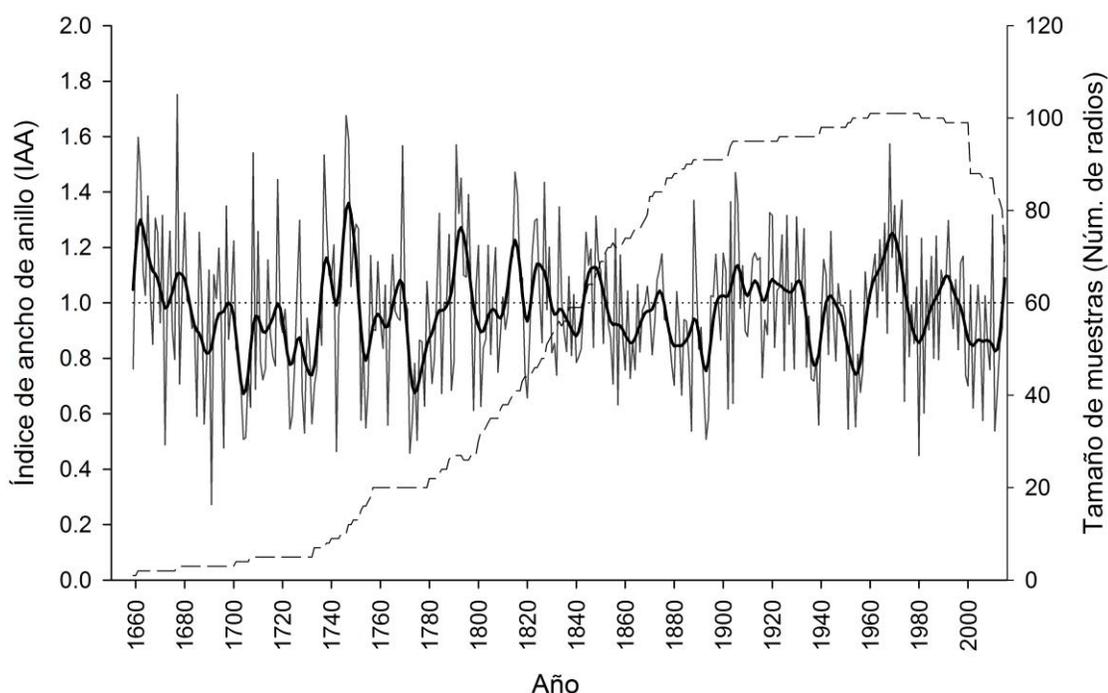
**Cuadro 5.** Coordenadas de las estaciones meteorológicas.

Estación	Latitud	Longitud	Datos observados	Datos utilizados
47141	27.938	-107.586		
46181	27.666	-107.586		
46182	27.666	-107.491		
46501	27.757	-107.586	1950-2015	1965-2015
47137	27.938	-107.966		
47146	27.938	-107.111		
50025	28.756	-107.206		
50658	28.937	-107.871		

Una vez analizada la respuesta climática, se desarrolló el modelo de regresión lineal con el software STATISTICA versión 10 (Statsoft, 2011). Se validó el modelo con las pruebas de calibración y verificación. Por último, se aplicó el modelo para reconstruir la precipitación en la extensión total de la cronología.

### 9.3 Resultados

De un total de 102 núcleos de crecimiento de 35 árboles, se logró fechar el 100% de las muestras. Se determinó una correlación entre series de  $r = 0.703$ , superando la mínima correlación significativa de  $r = 0.3281$  que establece COFECHA para alcanzar estadísticamente un buen fechado (Holmes, 1983). Finalmente, se logró generar una cronología de 357 años que comprende el periodo de 1659 a 2015 (Figura 19).

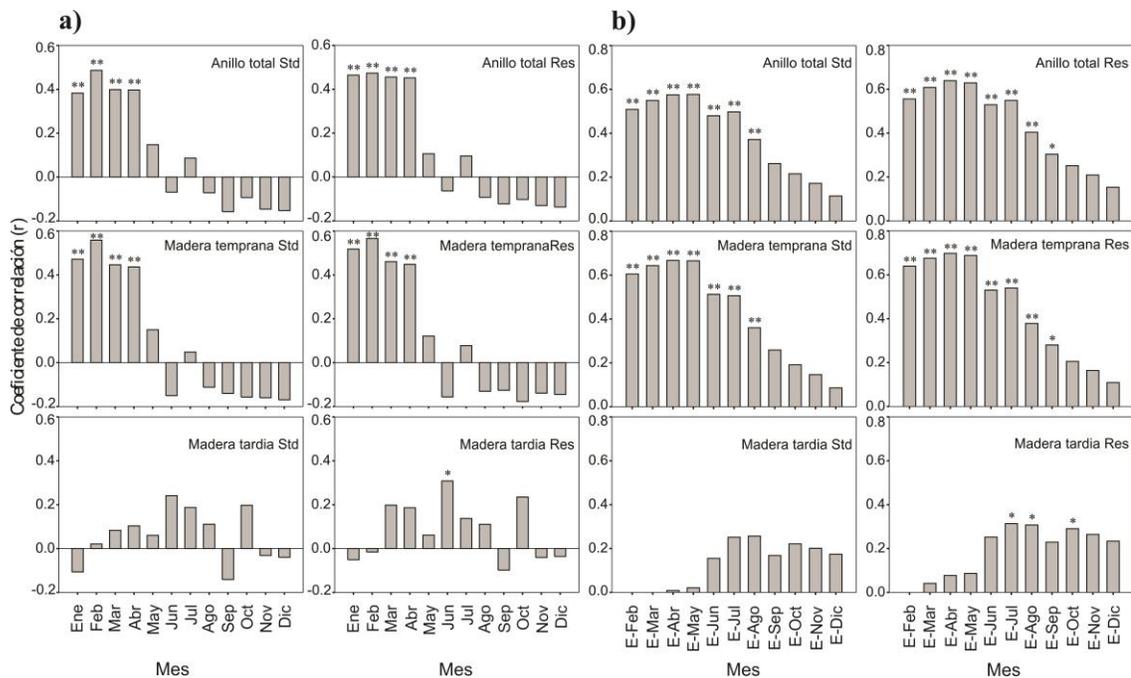


**Figura 19.** Serie de índice de ancho de anillo de 357 años para *P. menziesii*. La línea gris de fondo indica la variabilidad del índice de ancho de anillo anual. La línea en color negro es un spline de 10 años que permite observar eventos de baja frecuencia, y la línea punteada indica el tamaño de muestra en cada uno de los segmentos de la serie.

#### 9.3.1 Función de respuesta

La relación de precipitación con las cronologías estándar y residual indicaron que los meses de enero-abril influyen de manera significativa en el crecimiento del anillo total y la madera temprana ( $p < 0.001$ ) (Figura 20 a). Para el caso de la

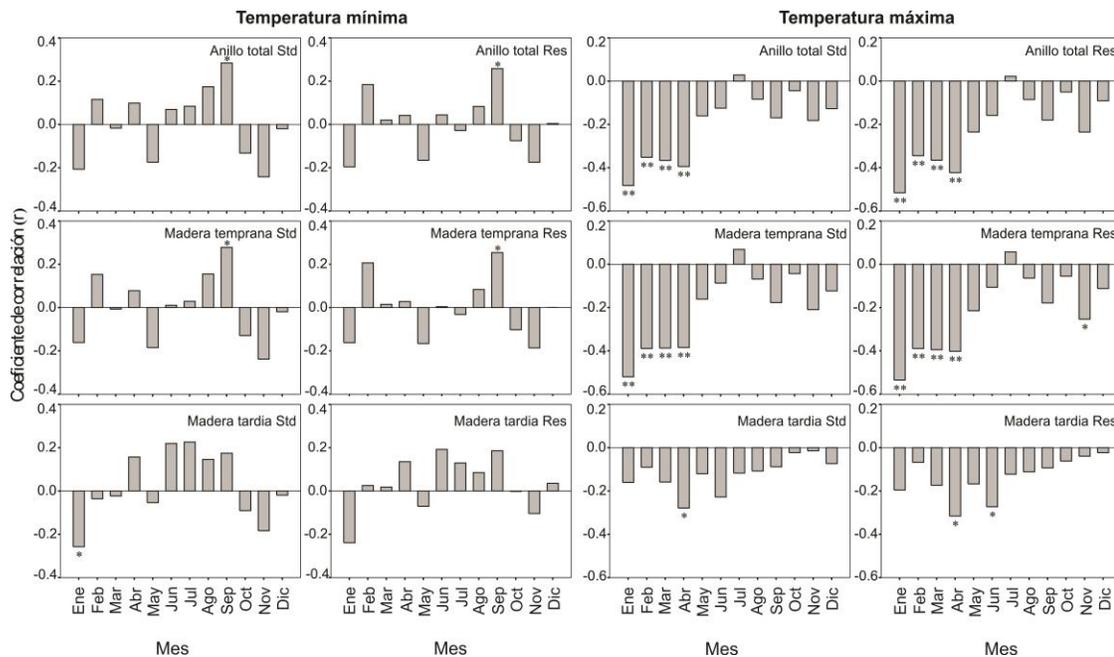
madera tardía la precipitación de los meses febrero-agosto registran una influencia positiva pero no significativa ( $p > 0.05$ ). Referente a la precipitación acumulada los periodos de lluvia de enero-agosto influyen de manera significativa ( $p < 0.001$ ) tanto en anillo total como en la madera temprana para ambas cronologías. Sin embargo, la máxima correlación se determinó entre la cronología estándar de madera temprana y el período estacional enero-mayo ( $r = 0.66$ ;  $p < 0.001$ ) (Figura 20 b).



**Figura 20.** Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de *P. menziesii* y la precipitación observada. (a) Las correlaciones de manera mensual y (b) correlaciones de manera acumulada. Donde \* =  $P < 0,05$  y \*\* =  $P < 0,01$  indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

La temperatura mínima de septiembre indica una influencia significativa ( $p < 0.05$ ) en el crecimiento del anillo total y la madera temprana y los meses de febrero, abril y junio-septiembre una influencia positiva no significativa ( $p > 0.05$ ). Para el caso de la madera tardía de abril y el período junio-septiembre influyen de manera positiva no significativa en el crecimiento. Por el contrario, la temperatura máxima del período enero-abril influye de manera negativa pero

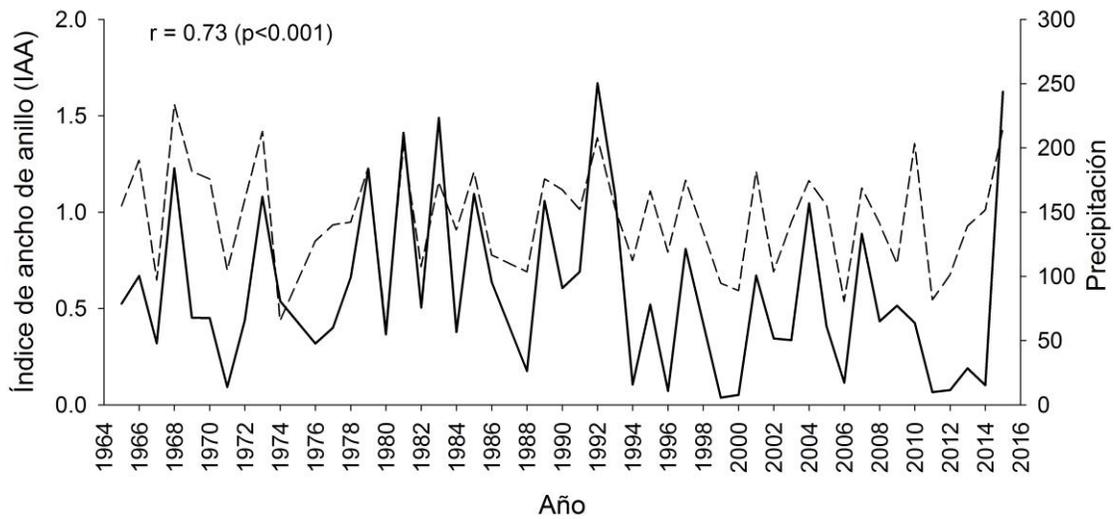
significativa ( $p < 0.001$ ) en el crecimiento del anillo total y la madera temprana para las dos cronologías (Figura 21).



**Figura 21.** Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo *P. menziesii* y Temperaturas (mínima y máxima). Donde \* =  $P < 0,05$  y \*\* =  $P < 0,01$  indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

### 9.3.2 Reconstrucción de precipitación

Al correlacionar la cronología de madera temprana con la precipitación estacional enero-mayo del periodo 1965-2015, una vez eliminados los años 1975, 1987, 1998, que registraron valores anormales, se determinó una correlación significativa de  $r = 0.73$  ( $p < 0.001$ ), lo cual indica que el crecimiento de la madera temprana explica el 53% de la variación de la precipitación para este periodo (Figura 22).



**Figura 22.** Relación entre índice de ancho de anillo de madera temprana de *P. menziesii* (línea punteada) y precipitación estacional enero-mayo de la estación climática regional (línea continua).

Se generó un modelo de regresión entre los datos meteorológicos (1965-2015) y la cronología de índice de anillo (Ecuación 2). El modelo presentó una correlación significativa  $r = 0.73$  ( $R^2 = 0.53$ ,  $p < 0.001$ ) (Cuadro 6 y 7).

$$Y_t = -78.1244 + 171.2797 * X_t \quad (2)$$

Donde:

$Y_t$  = Valor de precipitación reconstruido enero-julio (mm) para un año en específico  $t$  (variable dependiente).

$a = -78.1244$  constante de regresión

$b = 171.2797$  constante de regresión

$X_t$  = Índice de anillo total para un año en específico  $t$  (variable independiente).

**Cuadro 6.** Modelo lineal generado para la reconstrucción estacional de precipitación invierno–primavera *P. menziesii*.

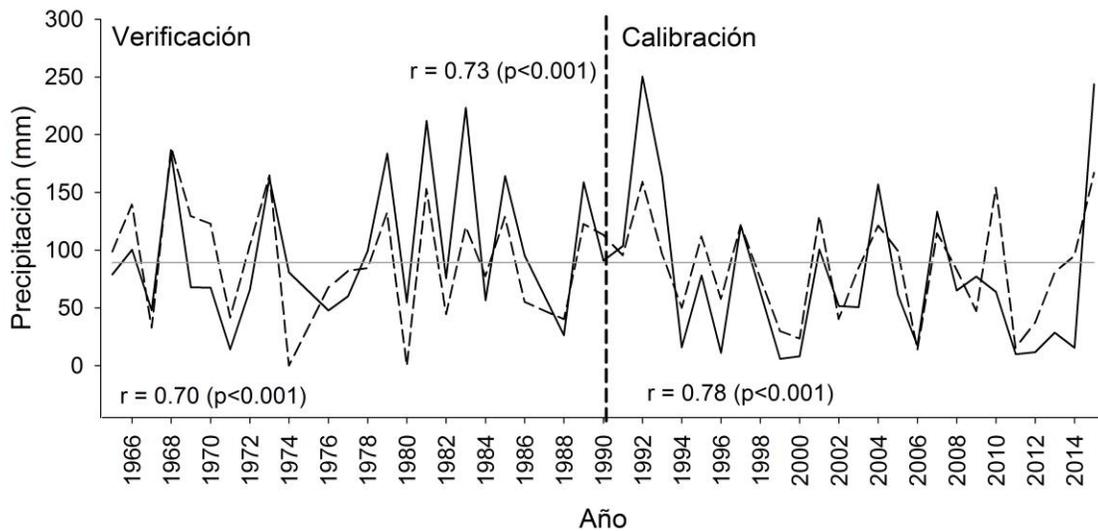
Periodo	R <sup>2</sup>	Coeficiente	Error estándar	Valor de t	Probabilidad
1965-2015	0.5373	a -78.1244	23.756	-3.289	0.00193
		b 171.2797	23.434	7.309	0.001

**Cuadro 7.** Análisis de Varianza del modelo de reconstrucción *P. menziesii*.

Periodo	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Regresión	110219.0	1	110219.0	53.42	0.001
Residual	94905.3	46	2063.2		
Total	205124.3				

### 9.3.3 Verificación y calibración

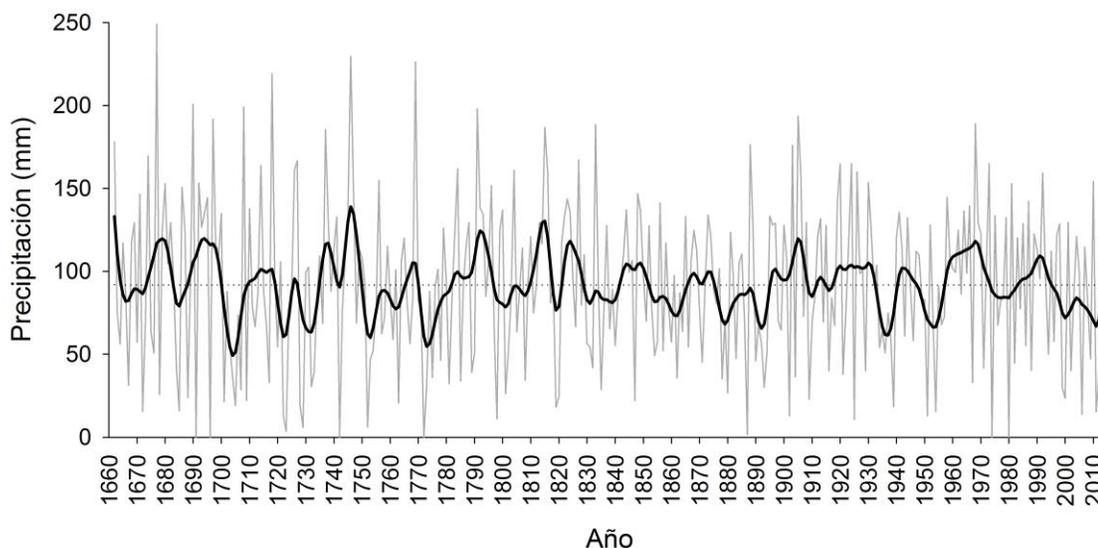
Para validar el modelo de reconstrucción se desarrollaron dos pruebas estadísticas, una de verificación y otra de calibración. Los resultados indican que ambas pruebas estadísticas pasaron la prueba de significancia ( $p < 0.05$ ). El modelo se considera estadísticamente válido para reconstruir la precipitación en el periodo total de la cronología. La verificación presentó una correlación de  $r = 0.70$  ( $p < 0.001$ ) y explica el 49% de la variabilidad de la precipitación. Mientras la calibración mostró una correlación de  $r = 0.78$  ( $p < 0.001$ ) explicando 60% de la varianza (Figura 23).



**Figura 23.** Verificación y calibración del modelo de regresión de *P. menziesii*. La línea continua es la precipitación observada, la línea punteada es la precipitación reconstruida para el periodo enero-mayo.

### 9.3.4 Precipitación reconstruida

Se logró reconstruir la variabilidad de la precipitación estacional enero-mayo para los últimos 357 años (1659 – 2015). La precipitación en los pasados tres siglos y medio muestra variabilidad de alta y baja frecuencia (Figura 24). Se reconstruyeron importantes eventos sequía (1700-1707, 1718-1723, 1727-1733, 1749-1763, 1770-1778, 1796-1809, 1828-1840, 1851-1864, 1874-1894, 1931-1939, 1947-1956, 1973-1981, 1994-2012) y periodos con precipitación por encima de la media (1672-1682, 1689-1699, 1734-1739, 1744-1748, 1781-1795, 1810-1817, 1820-1827, 1841-1850, 1895-1907, 1916-1930, 1957-1971).



**Figura 24.** Reconstrucción de *P. menziesii* del periodo invierno-primavera para los últimos 357 años (1659-2015). La línea de color gris de fondo indica la variabilidad anual de la precipitación, la línea de color negro representa un Spline de 10 años que permite observar eventos de baja frecuencia como sequías y período húmedos, y la línea punteada horizontal indica la precipitación promedio.

#### 9.4 Discusión

Se logró fechar el 100% de las muestras. Los resultados de inter-correlación entre las series fue de  $r = 0.703$  superando la mínima correlación significativa ( $r = 0.3281$ ,  $p < 0.01$ ) que establece COFECHA para considerar un adecuado fechado (Holmes, 1983). Otros autores han obtenido valores de correlación similares a los encontrados en el estudio son Cerano *et al.* (2009), Villanueva *et al.* (2009b), Arreola *et al.* (2010), Cerano *et al.* (2011b), Cerano *et al.* (2012) y Villanueva *et al.* (2014). Esta investigación reafirma el potencial de *P. menziesii* para el desarrollo de cronologías.

*P. menziesii* respondió de manera significativa al periodo de lluvia enero-mayo ( $r = 0.73$ ,  $p < 0.01$ ), lo cual se puede atribuir a que existe humedad almacenada en el suelo de la estación invernal, cuando las precipitaciones son de baja intensidad y permiten una mayor infiltración y saturación del suelo, humedad que es aprovechada por el árbol al iniciar su crecimiento. El crecimiento de la

madera temprana de *P. menziesii* está ligada significativamente ( $p < 0.05$ ) con la precipitación invernal. Esta relación se ha reportado en diferentes estudios en la Sierra Madre Occidental (Cerano *et al.*, 2009; Cleaveland *et al.*, 2003; Stahle *et al.*, 1998; Villanueva *et al.*, 2009a) y en la Sierra Madre Oriental (Cerano *et al.*, 2011)

La temperatura máxima responde de forma negativa significativa ( $p < 0.001$ ) a los meses enero-abril. Esta respuesta se atribuye a que en el mes de abril se registra un aumento importante de las temperaturas, llegando a registrar temperaturas extremas de 29 °C. A mayor temperatura en los primeros meses del año y escasas precipitaciones origina un aumento de la evapotranspiración disminuyendo la humedad relativa. Temperaturas por encima de 25 °C reducen drásticamente la apertura de estomas y por consiguiente una respuesta negativa al crecimiento (Leverenz, 1981).

La reconstrucción de *P. menziesii* para el municipio de Bocoyna registra periodos secos y periodos lluviosos que sincronizan con reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas para el norte de México; por ejemplo, en Mesa de las Guacamayas al norte de Chihuahua, se reconstruyeron los periodos secos de 1700-1707, 1749-1763, 1770-1778, 1796-1809, 1947-1956, 1994-2012 y periodos lluviosos 1744-1748 y 1746 (Villanueva *et al.*, 2014), similares a los reportados para Bocoyna. En el suroeste de Chihuahua, coincidieron los periodos de sequía de 1700-1707, 1749-1763, 1796-1809, 1851-1864, y los periodos con mayor precipitación como 1672-1682, 1689-1699, 1734-1739, 1744-1748, 1810-1817, 1895-1907, 1916-1930, 1957-1971 (Cerano *et al.*, 2009). Para el Sureste de Coahuila, sequías para los periodos de 1700-1707, 1727-1733, 1749-1763, 1796-1809, 1851-1864, 1973-1981 y periodos de precipitación elevadas en 1744-1748 1737-1747 (Cerano *et al.*, 2011a), sincronizan con nuestro trabajo. Lo anterior indica una misma variabilidad con eventos extremos positivos y negativos en el norte de México, lo cual puede estar modulado por la influencia de fenómenos de circulación general.

## 9.5 Conclusiones

Se logró reconstruir la precipitación estacional invierno-primavera (enero-mayo) para los últimos 357 años (1659 – 2015). Se identificaron eventos extremos que sincronizaron con la variabilidad de la precipitación entre reconstrucciones de diferentes regiones del norte de México. La variabilidad climática es influenciada por fenómenos climatológicos de circulación general.

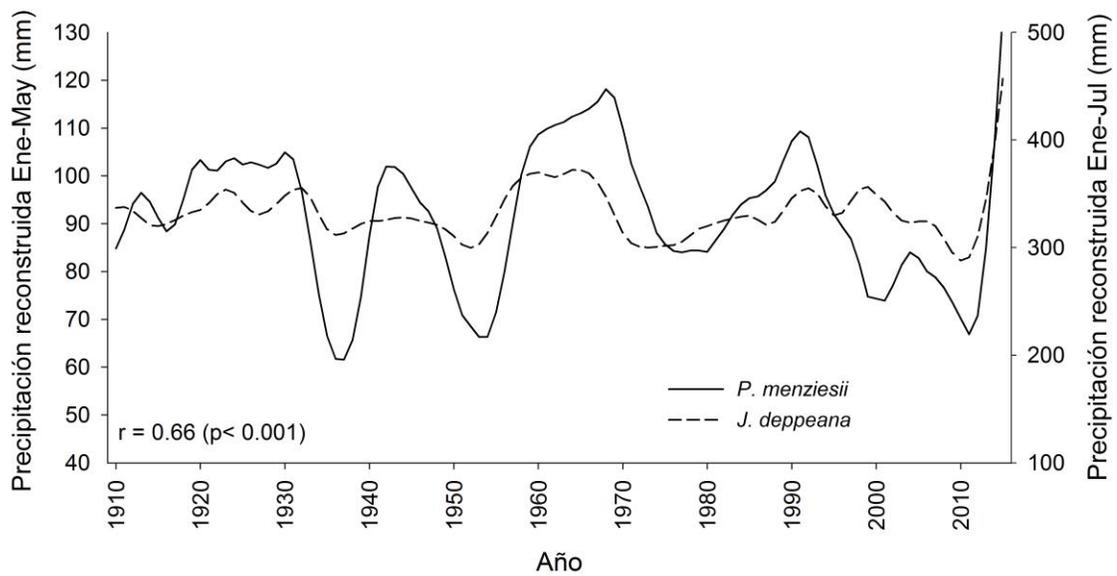
Esta reconstrucción permite incrementar la red de cronologías de *P. menziesii* en el norte del país, analizar la variabilidad climática a escala local y regional. Así mismo, determinar la frecuencia y extensión de eventos extremos como sequías.

## 10 VARIABILIDAD COMÚN ENTRE CRONOLOGÍAS

Se logró reconstruir la variabilidad de la precipitación para la región de Bocoyna, Chihuahua, para los últimos 223 años con base en *J. deppeana* y 357 años con base en *P. menziesii*. Ambas reconstrucciones presentan una variabilidad climática común estadísticamente significativa ( $r=0.66$ ;  $p<0.001$ ), lo cual sugiere una variabilidad climática regional común o una influencia de fenómenos climáticos que afectan el clima a mayor escala (Figura 25).

Los periodos de sequía de 1931-1939, 1947-1956, 1973-1981 y 1994-2012 registrados en ambas reconstrucciones, se han reconstruido empleando anillos anuales de *P. menziesii* en diferentes estudios en la Sierra Madre Occidental (Cerano *et al.*, 2012; Cerano *et al.*, 2009; Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 1998; Villanueva *et al.*, 2007; Villanueva *et al.*, 2014).

El periodo de 1948-1955 representa una intensa de sequía para las dos reconstrucciones, evento extremo que se ha detectado en reconstrucciones paleoclimáticas para todo el país (Cerano *et al.*, 2014; Cerano *et al.*, 2011a; Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2007). Para el caso específico de *J. deppeana*, a partir del año 1932 y hasta 1955, la precipitación no superó la media, registrándose una sequía de más de dos décadas. Por el contrario, para *P. menziesii* este período se divide en dos eventos de 1932-1939 y de 1942-1947, en los que se registró un período con precipitación que superó la media. Se puede inferir que, aunque ambos sitios de estudio se encuentren en una misma región geográfica, para ciertos años la variación climática local es diferente (sequía más prolongada en el sitio donde crece *J. deppeana*) y que eventos influenciados por fenómenos climáticos generales son detectados por las dos especies a diferentes escalas geográficas.



**Figura 25.** Variabilidad común entre la reconstrucción de *P. menziesii* (línea continua) y la reconstrucción de *J. deppeana* (línea punteada).

Estos resultados indican que *J. deppeana* es una especie que puede ser utilizada para futuros estudios dendroclimáticos debido a la similitud con *P. menziesii*, especie para la cual ha sido demostrado su excelente potencial dendroclimático y una de las más estudiadas en el norte de México (Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011).

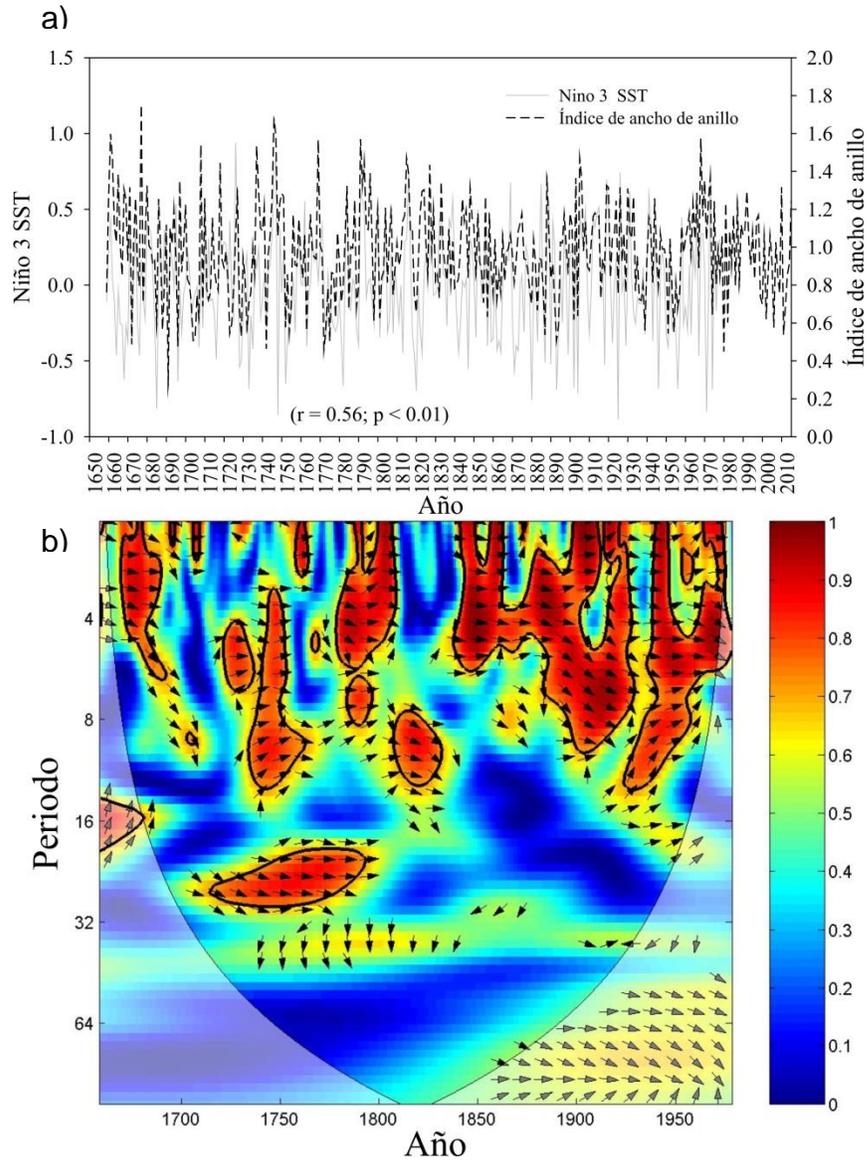
## **11 INFLUENCIA DEL ENSO EN LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA**

Cuando la precipitación o temperatura sale de su valor promedio en un lapso de tiempo, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano, y forzamientos externos que pueden ser cambios en la intensidad de la radiación solar o incluso cambios del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios de uso de suelo, etc.) resultados de la actividad antropogénica. Las formas de variabilidad del clima son muchas, por lo tanto, pronosticarlo a largo plazo es complicado. Es por ello que conocer qué produce cambios en el clima de un año a otro en una escala de tiempo extensa, constituye un reto científico (Magaña, 2004).

El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es una alteración global del sistema océano-atmósfera, en la cual la atmósfera responde a las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial e impacta a todo el planeta. Estos eventos se caracterizan por una corriente a gran escala de aguas cálidas del Pacífico ecuatorial en dirección oeste-este, misma que produce una alteración de los patrones de circulación de los vientos, temperaturas y precipitación, alterando de manera significativa la climatología del Pacífico (Azuz, 2010).

La precipitación reconstruida para el municipio de Bocoyna, Chihuahua, ha sido modulada de manera significativa  $r = 0.56$  ( $p < 0.01$ ) por el fenómeno climático ENSO durante los pasados tres siglos y medio (Figura 26 a). Los eventos extremos positivos (lluvia) y negativos (sequía) están regulados por este fenómeno en sus fases El Niño y La Niña, respectivamente. Estos resultados

coinciden con estudios realizados para la Sierra Madre Occidental (Stahle *et al.*, 1998; Cerano *et al.*, 2011b).



**Figura 26.** a) Relación entre precipitación reconstruida para Bocoyna, Chihuahua y los índices NIÑO 3 SST. b) Coherencia anual de ondeleta entre la cronología regional de Bocoyna y los índices NIÑO 3 SST. Las flechas horizontales hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (que su relación es positiva). Las manchas rojas delimitadas por una línea negra indican una relación significativa ( $p < 0.05$ ).

Mediante el análisis espectral de coherencia de ondeletas se analizó la influencia del ENSO sobre la variabilidad de la precipitación reconstruida para

los últimos tres siglos y medio (Figura 26 b). Se aprecia una respuesta significativa a lo largo del tiempo con frecuencias de 1 a 4 años. Sin embargo, posterior a 1830 esta relación en fase se observa con mayor frecuencia y periodos más prolongados.

La relación significativa de ENSO en el área de estudio representa información de gran relevancia, este fenómeno ha modulando el clima durante los pasados tres siglos y medio. En la actualidad la fase negativa o positiva del ENSO se puede predecir con anticipación, es posible poder tomar las medidas necesarias para reducir impactos negativos en los ecosistemas. Los programas de manejo enfocados a la conservación de esta área de importancia ecológica por la preservación tanto de *P. menziesii* como de *P. chihuahuana*, debe considerar la influencia positiva y negativa de ENSO en el futuro. Saber qué parte de la variabilidad del clima es predecible, abre la posibilidad de realizar predicciones útiles en diversas actividades de manejo y conservación de ecosistemas (Magaña, 2004).

## 12 CONCLUSIONES

La serie de crecimiento de *J. deppeana* fechada al año exacto de formación, representa la primera cronología desarrollada para esta especie en México. Sus anillos de crecimiento anual representan un excelente proxy de la variabilidad de la precipitación. Se determinó su potencial dendroclimático y capacidad para desarrollar una red de estudios paleoclimáticos a lo largo de la Sierra Madre Occidental, debido a que se han encontrado especímenes con más de 500 años de edad.

Los crecimientos anuales de *J. deppeana* y *P. menziesii* permitieron reconstruir la variabilidad de la precipitación de los últimos 357 años para la región de Bocoyna, Chihuahua. Se aceptan las dos hipótesis de investigación planteadas, que establecen: (1) que los crecimientos anuales de *J. deppeana* son sensibles a la variabilidad climática y (2) que las especies de *J. deppeana* y *P. menziesii* registran una tendencia de baja frecuencia similar en los últimos dos siglos.

El crecimiento de estas dos especies, al igual que otras coníferas del norte de México, está influenciado por factores climáticos, dentro de los que sobresalen la precipitación. Esta variable es el factor limitante que explica la variabilidad del crecimiento de manera importante en esta región del norte del país. El crecimiento del *J. deppeana* responde de manera significativa al periodo de precipitación estacional enero - julio, mientras que *P. menziesii* respondió a la precipitación enero-mayo. La sensibilidad climática de *J. deppeana* superó a la especie de referencia *P. menziesii*.

Ambas reconstrucciones de precipitación mostraron una variabilidad común de baja y alta frecuencia, lo que indica que la variabilidad climática regional esta modulada por fenómenos climáticos de circulación general. La relación de la precipitación regional con los índices NIÑO 3 SST mostró una relación positiva

significativa, el ENSO a modulado la variabilidad de la precipitación en los pasados tres siglos, entender la influencia de este fenómeno en el clima de esta región de importancia ecológica, es de gran utilidad para el desarrollo de programas de manejo y conservación. Con estas dos nuevas reconstrucciones se amplió la red de estudios para la Sierra Madre Occidental, lo que permitirá un mejor entendimiento de eventos extremos, analizar frecuencias y la recurrencia de posibles eventos futuros.

### 13 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Adams, R. P., & Schwarzbach, A. E. (2006). Intraspecific adjustments in *Juniperus deppeana* (cupressaceae). *Phytologia*, 88(3), 227-232.
- Aguilar Soto, V., Melgoza Castillo, A., Villarreal Guerrero, F., Wehenkel, C., & Pinedo Alvarez, C. (2015). Modeling the potential distribution of *Picea chihuahuana* Martínez, an endangered species at the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*, 6(3), 692-707. <http://doi.org/10.3390/f6030692>
- Arreola Ortiz, M. R., González Elizondo, M., & Návar Cháidez, J. de J. (2010). Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. *Madera y Bosques*, 16(1), 71-84.
- Azuz Adeath, I. (2010). Evidencias de cambios de largo plazo en algunas variables climáticas de los estados costeros de México. En *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche* (pp. 23-32).
- Biondi, F. (2000). Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, USA? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32(2), 111-116.
- Borja de la Rosa, A., Machuca, R., Fuentes Salinas, M., Ayerde Lozada, D., Fuentes López, M., & Quintero Alcantar, A. (2010). Caracterización tecnológica de la madera de *Juniperus flaccida* var. Poblana Martínez. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, XVI(2), 261-280. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.083>.
- Cerano Paredes, J. (2004). Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*, 1-170.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Arreola Avila, J. G., Sánchez Cohen, I., Valdez Cepeda, R. D., & Garcia Herrera, G. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Cervantes Martínez, R., Vázquez Selem, L., Trucíos Caciono, R., & Guerra de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geograficas*, 83,

41-54 <http://doi.org/10.14350/rig.35190>.

- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Cervantes Martínez, R., Vázquez Selem, L., Trucíos Caciono, R., & Guerra de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geograficas*, 83(July), 41-54. <http://doi.org/10.14350/rig.35190>.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Constante García, V., González Barrios, J. L., & Estrada Ávalos, J. (2012). Precipitación Reconstruida Para La Parte Alta De La Cuenca Del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 3(10).
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Méndez González, J., & Constante García, V. (2011a). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 235-249.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Cornejo Oviedo, E. H., Sánchez Cohen, I., & Constante García, V. (2011b). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 3(4), 33-48.
- Chávez Gándara, M. P., Cerano Paredes, J., Nájera Luna, J. A., Pereda Breceda, V., Esquivel Arriaga, G., Cervantes Martínez, R., Corral Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno- primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387-399. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva Díaz, J., & Burs, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(1), 369-388. <http://doi.org/10.1023/A>.
- Constante García, V., Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Cornejo Oviedo, E. H., & Valencia Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. Y Reconstrucción de Precipitación, estacional para el sureste de Coahuila. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Cook, E. R. (2000). Nino 3 Index Reconstruction. *International Tree-Ring Data Bank*.
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic.
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-

- rings, 1647–1992. *Climate Research*, 22(3), 237-244.
- Díaz Ramírez, B., Villanueva Díaz, J., & Cerano Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111-123.
- Domínguez Álvarez, F. A., Vargas Hernández, J. J., López Upton, J., Ramírez Vallejo, P., & Guízar Nolasco, E. (2004). Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología, UNAM. Serie Botánica*, 75(2), 191-203.
- Esper, J., Cook, E. R., & Schweingruber, F. H. (2002). Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295(5563), 2250-2253.
- Flores García, A., Castillo Martínez, C. R., Pineda Ojeda, T., Guerra de la Cruz, V., & Toledo García, K. I. (2013). Macropropagación asexual de *Pseudotsuga menziessi* (Mirb.) Franco a través del enraizamiento de estacas (Folleto Técnico N°8). México, D.F.: CEBID-COMEF, INIFAP.
- Florescano, E., & Swan, S. (1995). *Breve historia de la sequía en México*. Universidad Veracruzana Direccion Editorial.
- Fritts, H. C. (1976). Tree rings and climate. *Academic, San Diego, Calif*, 567.
- Fritts, H. C. (1991). Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: t diagnostic analysis. University of Arizona Press.
- Froehlich, M. (2008). Development of a Tree-Ring Chronology from Eastern Red Cedar (*Juniperus virginia*, L.) for the Upper Mississippi River Valley. *UW-L Journal of Undergraduate Research XI*.
- Fulé, P. Z., Villanueva Díaz, J., & Ramos Gómez, M. (2005). Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua , Mexico. *NRC Research Press Web*, 35, 320-330. <http://doi.org/10.1139/X04-173>.
- García, E. (2004). Climas (clasificación de Koppen, modificado por García). *Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 6(1), 0.
- Gartner, B. L., North, E. M., Johnson, G. R., & Singleton, R. (2002). Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 439-447. <http://doi.org/10.1139/X01-218>.
- Génova, R. (1988). Comparación de tres series dendrocronológicas del valle de Conangles (Pirineo central). *Orsis: organismos i sistemes*, 3, 105-120.

- Gómez Guerrero, A., Martínez Molina, C., Martínez Trinidad, T., Velázquez Martínez, A., Sardiñas Gómez, O., Rivera, C., & Toruño, P. J. (2015). Índices De Anillos De Crecimiento En Dos Coníferas Del Centro De México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 1(1), 134-148. <http://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2146>.
- González Elizondo, M. (2003). Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la Sierra Madre Occidental, Mexico. *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 1-193.
- Grissino-Mayer, H. D. (1996). Principios de la dendrocronología. Recuperado a partir de <http://web.utk.edu/~grissino/principles.html>.
- Gutiérrez Merino, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. *Arqueología nautica mediterrània*, 309-322.
- Herrán, C. (2012). El cambio climático y sus consecuencias para América Latina. Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert-FES. México.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*.
- INEGI. (2017). *Carta edafológica escala 1:20 000. Numero de carta G1301*.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA). (2000). Extractor rápido de información climatológica III (ERIC). *Software. Jiutepec, Morelos, México*.
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva Díaz, J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93–105.
- Kaennel, M., & Schweingruber, F. H. (1995). Multilingual glossary of dendrochronology: Terms and definition in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Birmensdorf heme (Swiss Fede). Paul Haupt Publisher.
- Klepac, D. (1976). Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques.
- Lara, A. (2000). Importancia científica, protección legal y uso destructivo de los bosques de alerce (*Fitzroya cupressoides*): una contradicción que debe resolverse. *Bosque Nativo*, 27, 3-13.
- Lara, A., & Villalba, R. (1993). A 3,620-year temperature record from *Fitzroya cupressoides* tree rings in South America. *Science*, 260, 1104–1106.

- Ledig, F. T., Mápula Larreta, M., Bermejo Velázquez, B., Reyes Hernández, V., Flores López, C., & Capó Arteaga, M. Á. (2000). Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. *Madroño*, 47(2), 71-88.
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: diurnal variation. *Canadian Journal of Botany*, 59(3), 349-356.
- Magaña, V. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. *Cambio climático: una visión desde México*. Ed. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.(México), 17-28.
- Martínez, A. J., Sainos, P., Lezama Delgado, E., & Angeles Álvarez, G. (2007). El tamaño sí importa: los frutos grandes de *Juniperus deppeana* Steud. (sabino) son más susceptibles a depredación por insectos. *Madera y Bosques*, 13(2), 65-81.
- Mendoza Maya, E., Espino Espino, J., Quiñones Pérez, C. Z., Flores López, C., Wehenkel, C., Vargas Hernández, J. J., & Sáenz Romero, C. (2015). Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de picea en peligro de extinción. *Revista fitotecnía mexicana*, 38(3), 235-247.
- Naylor, T. H. (1971). Dendrochronology in Oaxaca, Mexico: a preliminary study. *Tree-ring Bulletin*.
- Neira, E. (1995). Desarrollo de cronologías para Alerce (*Fitzroya cupressoides* (Molina) Johnston) en las cordilleras de la Costa y de los Andes. *Desarrollo de cronologías para Alerce (Fitzroya cupressoides (Molina) Johnston) en las cordilleras de la Costa y de los Andes*.
- Pompa García, M., Dávalos Sotelo, R., Rodríguez Téllez, E., Aguirre Calderón, O. A., & Treviño Garza, E. J. (2014). Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana. *Madera y Bosques*, 20(3), 139-151.
- Rivera Arriaga, E., Azuz Adeath, I., Alpuche Gual, L., & Villalobos Zapata, G. J. (2010). *Cambio climático en México un enfoque costero-marino*. Universidad Autónoma de Campeche Cety-Universidad. Gobierno del Estado de Campeche.
- Rozas, V., DeSoto, L., & Olano, J. M. (2009). Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus thurifera*. *New Phytologist*, 182(3), 687-697.
- Salisbury, F. B. R., Cleon, W. R., Frank, B. S., & Cleon, W. R. (1994). *Fisiología vegetal*. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Sánchez Montante, O. (2010). Elementos oceánicos que impactan la hidrología

- costera. In: *Cambio climático en México un enfoque costero-marino. Universidad Autónoma de Campeche Cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche* (pp. 23-32).
- Sánchez Zavaleta, C. A. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 33, 128-138.
- Schulman, E. (1944). Dendrochronology in Mexico, I. *Tree-Ring Bulletin*.
- Schweingruber, F. H., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1991). Yearly maps of summer temperatures in Western Europe from AD 1750 to 1975 and Western North America from 1600 to 1982. *Vegetatio*, 92(1), 5-71.
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., & Bräker, O. U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8, 9-38.
- Scott, S. D. (1966). Dendrochronology in Mexico. Report of the Laboratory of Tree-Ring Research. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT). (2010). NOM 059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. *Diario oficial*.
- Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Gay, D. A., D'arrigo, R. D., Krusic, P. J., Dunbar, R. B. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152.
- Statsoft, I. (2011). *Statistica*.(Version 10) StatSoft Inc.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). An introduction to tree-ring dating. Chicago: University of Chicago Press.
- Suzan, H. y M. Franco. 1981. Estudios dendrocronológicos en México en poblaciones de *Pinus hartwegii*. En: *Memorias del VII Congreso Mexicano de Botánica*, 277 – 278.
- Tejeda Martínez, A., & Rodríguez Viqueira, L. (2007). Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático de México. *Investigaciones geográficas*, (62), 31-43.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107.
- Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., & Lisi, C. S. (2000). Potencialidade da

familia Meliaceae par dendrocronología em regiões tropicais e subtropicais. *Dendrocronología en América Latina*, 381-431.

- Touchan, R., Funkhouser, G., Hughes, M. K., & Erkan, N. (2005). Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change*, 72(3), 339-353.
- Valero Padilla, J. (2004). Estudio taxonómico y distribucional de los mamíferos del bosque fragmentado de *Juniperus*, del ejido San Juan y Puentes Aramberri, Nuevo León, México. *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 65.
- Ventura Ríos, A., López Upton, J., Vargas Hernández, J. J., & Guerra de la Cruz, V. (2010). Caracterización de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el centro de México. Implicaciones para su conservación. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 33(2), 107-116.
- Villagómez Loza, M. A., & Bello González, M. Á. (2015). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. glauca (Beissn.) Franco: nuevo registro para Guanajuato *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. glauca (Beissn.) Franco: a new record for the state of Guanajuato. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 6(30), 66-73.
- Villalba, R., Leiva, J. C., Rubulis, S., Suarez, J. A., & Lenzano, L. (1990). Climate, tree rings and glacier fluctuations in the Frías valley, Río Negro, Argentina. *Arctic and Alpine Research*, 22(3), 150-174.
- Villanueva Díaz, J., Fulé, P. Z., Cerano Paredes, J., Estrada Ávalos, J., & Sánchez Cohen, I. (2009a). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105), 39-71.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Constante García, V., Fulé, P. Z., & Cornejo Oviedo, E. H. (2009b). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques*, 15(3), 45-64.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés Montaña, C., Vázquez Selem, L., Yocom, L. L., & Ruiz Corral, J. A. (2014). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín de*, 141-153. <http://doi.org/10.14350/rig.44485>.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Olivares Bañuelos, N. C., Valles Pérez, M., Stahle, D. W., & Cervantes Martínez, R. (2015). Respuesta climática del ciprés (*Hesperocyparis guadalupensis*) en Isla Guadalupe, Baja California, México. *Madera y Bosques*, 21(3), 149-160.

- Villanueva Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo Oviedo, E. H. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117-131.
- Villanueva Díaz, J., Vázquez Selem, L., Gómez Guerrero, A., Cerano Paredes, J., Aguirre González, N. A., & Franco Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(2), 175-185.
- Zavala García, J. A. (2003). Caracterización de la roya del enebro (*Juniperus* spp.) en la sierra de Arteaga Coahuila. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*.