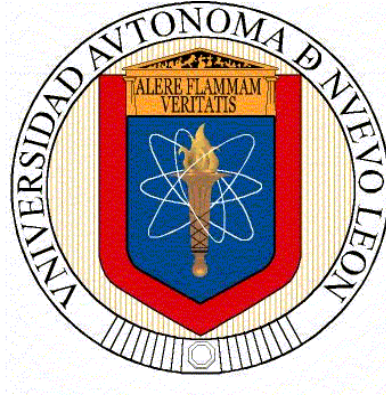


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



TESIS

**RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE VARIABLES
AMBIENTALES EN EL MANEJO ADAPTATIVO DE
LOS BOSQUES DE LA SIERRA JUÁREZ, OAXACA**

PRESENTADA POR

ANA MARÍA VÁSQUEZ GONZÁLEZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN RECURSOS NATURALES**

ENERO 2026

**RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE VARIABLES AMBIENTALES EN EL
MANEJO ADAPTATIVO DE LOS BOSQUES DE LA SIERRA JUÁREZ,
OAXACA**

Aprobación de Tesis

Dr. Marco Aurelio González Tagle
Director

Dra. Wibke Himmelsbach
Codirector

Dr. Eduardo Alanís-Rodríguez
Asesor

Dr. Javier Jiménez Pérez
Asesor

Dr. Julián Cerano Paredes
Asesor Externo

Dr. Marco Aurelio González Tagle
Subdirector de Estudios de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al SECIHTI por el financiamiento otorgado para el desarrollo de los estudios de Doctorado en la FCF-UANL, a las autoridades de la comunidad de Santa María Jaltianguis, Oaxaca, por las facilidades otorgadas para la elaboración de la investigación mediante la obtención de las muestras; al personal del laboratorio de Dendrocronología de la FCF-UANL, por las disposiciones brindadas para realizar el análisis.

DEDICATORIA

Quiero dedicar y agradecer a mi familia quienes fueron mi impulso para seguir luchando por mis objetivos.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
3. ANTECEDENTES	15
3.1. Situación del Manejo Forestal a nivel global	15
3.2. Especies maderables utilizadas en dendrocronología	16
3.3. Cronologías dendroclimáticas desarrolladas a nivel global.....	17
3.4. Perspectivas del manejo mediante la dendroecología	19
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
4.1. Área de estudio	24
4.2. Muestreo	25
4.3. Toma de muestras en campo	26
4.4. Señal expresada de la población (EPS)	26
4.5. <i>Pinus hartwegii</i>	26
4.6. <i>Pinus pseudostrobus</i>	27
4.7. Toma de muestra de <i>Pinus hartwegii</i>	27
4.8. Toma de muestra de <i>Pinus pseudostrobus</i>	27
4.9. Preparación de muestras de laboratorio	28
4.10. Análisis de laboratorio.....	29
4.11. Desarrollo de la cronología	30
4.12. Análisis estadístico.....	31
4.13. Obtención de datos climáticos	31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1. Cronología.....	33
5.2. Función de respuesta de <i>Pinus hartwegii</i>	36
5.2.1. Anillo total.....	36
5.2.2. Correlación de Madera temprana	38

5.2.1.	Correlación de Madera tardía	38
5.3.	Precipitación <i>Pinus pseudostrobus</i>	41
5.4.	Temperatura <i>Pinus pseudostrobus</i>	44
5.5.	Años secos	47
5.6.	Años húmedos.....	47
6.	CONCLUSIONES	47
7.	REFERENCIAS	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de muestreo en el municipio de Santa María Jaltianguis, Oaxaca.....	25
Figura 2. Visualización de los anillos de crecimiento una vez realizado el pulido.	28
Figura 3. Etapas y tareas del estudio dendrocronológico. A) Muestreo con barrero de Pressler, B) Extracción del testigo con el barreno de Pressler, C) Montaje de muestras en molduras de madera y D) Pulido mediante lijas de diferente granulometría hasta la visualización adecuada de los anillos.....	29
Figura 4. Cronología residual de anillo total (RWI) <i>Pinus hartwegii</i> Lindl (línea continua) y tamaño de muestra (línea punteada). La línea en color azul indica la fecha a partir de donde la cronología rebasa el valor de EPS de 0.85. La línea negra discontinua representa el umbral para un nivel de confianza significativo ($p < 0,05$).....	35
Figura 5. Cronología residual de índice de ancho de anillo total para <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.....	36
Figura 6. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación con el ancho del anillo (RWI) de <i>Pinus hartwegii</i> para el período 1955-2002.	37
Figura 7. Asociación entre el índice de anillo total y la precipitación acumulada diciembre-abril con registros de las estaciones meteorológicas en el período 1955-2002.	37
Figura 8. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación y temperatura con la madera temprana (EWR) para el período 1955-2002.....	38
Figura 9. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación y temperatura con la madera tardía (LWR) para el período 1955-2002.	39
Figura 10. Coeficiente de correlación entre la precipitación mensual y acumulada (1910 a 2018) y los índices de RWI, EWI y LWI. Las correlaciones significativas ($P < 0.01$) están representadas con barras en color negro.	42
Figura 11. Relación entre el índice de ancho de anillo (RWI, EWI y LWI) y precipitación estacional	43
Figura 12. Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de madera temprana de <i>Pinus pseudostrobus</i> y la temperatura mínima promedio.....	45
Figura 13. Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de <i>Pinus pseudostrobus</i> y la temperatura máxima promedio.....	46

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones climáticas analizadas en el estudio.	32
Cuadro 2. Resultados estadísticos generados por el programa COFECHA para el ancho de anillos de <i>P. hartwegii</i>	34
Cuadro 3. Resumen de las correlaciones significativas de temperatura mínima ($T_{mín}$) y temperatura máxima ($T_{máx}$).....	44

RESUMEN

El clima ha evolucionado de manera natural, en la actualidad diversas pruebas revelan un nuevo cambio climático. Utilizar datos instrumentales y fuentes proxy para conocer el comportamiento del clima, es una de las fuentes indirectas más confiables. Considerando lo anterior, se determinó el potencial de respuesta dendrocronológica de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus hartwegii* al asociar la anchura de los anillos de crecimiento (madera temprana “RWI”, madera tardía “EWI” y anillo total “LWI”) con las variables climáticas en la región.

La asociación de los índices de ancho de anillo de *Pinus pseudostrobus* con la precipitación en el periodo de mayor relación significativa con el anillo total, madera temprana y madera tardía fue en periodo enero-marzo ($p < 0.01$) con $r = 0.58$; $r = 0.42$; $r = 0.37$. De mismo modo la correlación de *Pinus hartwegii* fue en el periodo de diciembre-abril ($p < 0.01$) con $r = 0.43$; $r = 0.38$; $r = 0.27$.

La precipitación es la variable con mayor influencia en el desarrollo de los anillos en ambas especies.

Palabras clave: cronología; variabilidad climática; anillos de crecimiento; dendrocronología; precipitación; *Pinus pseudostrobus*

ABSTRACT

The climate has evolved naturally, and currently, various tests reveal a new climate change. Using instrumental data and proxy sources to understand climate behavior is one of the most reliable indirect sources. Considering this, the dendrochronological response potential of *Pinus pseudostrobus* and *Pinus hartwegii* was determined by associating growth ring width (earlywood "RWI", latewood "EWI", and total ring width "LWI") with climatic variables in the region. The association of the ring width indices of *Pinus pseudostrobus hartwegii* with precipitation in the period with the greatest significant relationship with the total ring width, earlywood, and latewood was in the January-March period ($p < 0.01$) with $r = 0.58$; $r = 0.42$; $r = 0.37$. Similarly, the correlation of *Pinus hartwegii* was in the December-April period ($p < 0.01$) with $r = 0.43$; $r = 0.38$; $r = 0.27$.

Precipitation is the variable with the greatest influence on ring development in both species.

Keywords: chronology; climatic variability; growth rings; dendrochronology; precipitation

1. INTRODUCCIÓN

El manejo forestal está constituido por acciones encaminadas a la ordenación y administración del bosque, considerando la condición ecológica para la protección de los bienes y servicios donde se respecta la capacidad productiva, logrando con ello el manejo sustentable o sostenible (Aguirre-Calderón, 2015). Una de las estrategias de evaluación de las áreas boscosas, es la dendrocronología, debido a que se logra reconstruir la historia del manejo del bosque mediante el análisis de los incrementos anuales (Fritts, 1976). El comportamiento del clima presenta variaciones de manera natural que se pueden observar en elementos de la anatomía de la madera, alguno de estos elementos refleja los cambios de clima. Sin embargo, factores como el suelo, disponibilidad de agua, nutrientes, la calidad del sitio, prácticas silvícolas aplicadas, entre otros, también influyen en su formación (Del Valle et al., 2012).

La mayoría de los estudios dendrocronológicos se han realizado con las coníferas por su estructura leñosa, donde se aprecia claramente los diferentes crecimientos de la madera (Schweingruber, 1988). Recientemente se han incluido especies que se distribuyen en los trópicos y zonas semi áridas a manera de ampliar las cronologías y entender el comportamiento de las variaciones climáticas a diferentes altitudes (Villalba et al., 2000). Los análisis dendrocronológicos son importantes para la determinación de la dinámica de las poblaciones o comunidades arbóreas en el que se determina la calidad de sitio, con el fin de planificar la extracción maderable del recurso a largo plazo. Además,

nos permite conocer la respuesta de la vegetación a los factores negativos derivados por el cambio climático (Srur et al., 2008).

Rojas-García et al. (2020) señalan que en los bosques naturales el clima es principal factor regulador del crecimiento de las especies, el cual genera el proceso de formación de los anillos anuales; donde el análisis de su crecimiento ha permitido mejorar y ampliar los registros meteorológicos en relación con los registros de datos instrumentales (Aquino et al., 2019). De esta manera, el uso de métodos dendrocronológicos para la reconstrucción histórica del clima ha sido ampliamente evaluado considerándolo como una fuente de información confiable y eficiente (Bradley, 1999; Villanueva et al., 2018; Manzanilla-Quiñones et al., 2023). Los anillos se consideran registros permanentes y continuos de los árboles que se desarrollan en el entorno ambiental (Reyes-Basilio et al., 2021). De acuerdo con Manzanilla-Quiñones et al. (2020), la formación y ancho de los anillos se encuentra rectamente asociado a los factores ambientales, edáficos, topográficos y ecológicos, del área donde se pretende evaluar. Diversos autores señalan a la lluvia como el factor principal y limitante del crecimiento, sobre todo en especies de coníferas (Manzanilla-Quiñones et al., 2020; Brichta et al., 2024). Aunado a lo anterior, el crecimiento de los anillos se verá reflejado en suelos profundos y sitios con mucha disponibilidad de luz, por tanto, la relación entre el crecimiento arbóreo y condiciones ambientales permite hacer deducciones sobre variables ambientales a partir del incremento o disminución del crecimiento de los anillos, además se pueden reconstruir algunas variables climatológicas (Gutiérrez et al., 2022).

Particularmente, los estudios dendrocronológicos en México solo se han documentado en las zonas Norte-Centro del país, mientras que en la región sur los estudios son limitados (Aquino, 2019). La Sierra Sur de Juárez de Oaxaca es considerada como uno de los sistemas montañosos más diversos, estos ecosistemas presentan altas tasas de biodiversidad y se encuentra distintos tipos de vegetación, dominando el bosque de pino-encino y el bosque mesófilo de montaña (Ponce-Reyes et al., 2012). Entre las especies más abundante en la región se encuentra *Pinus hartwegii* la cual posee un gran valor ecológico, por su adaptabilidad en zonas con grandes altitudes y bajas temperaturas; siendo en promedio su intervalo altitudinal 2 200 a 3 300 m; aunque es posible que se encuentre en altitud superior a 3 300 msnm (Pérez-Suárez et al., 2022).

Pinus hartwegii Lindl ha sido poco estudiada en México, su importancia en la dendrocronología radica en que es considerada una especie subalpina que se desarrolla en bosques puros después de los 3,000 msnm, ya que sus anillos de crecimiento se encuentran bien definidos (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Manzanilla-Quiñones et al., 2021), esta especie posee una gran longevidad superando los 400 años (Villanueva-Díaz et al., 2015), además tiene una alta capacidad de respuesta fisiológica a factores climáticos. Dado lo anterior, funciona como una secuencia de la variación climática de la cual se puede extraer información climática relevante con ayuda de técnicas dendrocronológicas (Astudillo-Sánchez et al., 2017). Derivado de lo anterior se propuso como objetivo determinar el potencial dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus hartwegii* Lindl en la Sierra Juárez del estado de Oaxaca, así como la relación descriptiva del ancho de anillos con patrones de precipitación y temperatura regional.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta investigación fue desarrollar cronologías de dos especies de coníferas mediante el análisis del comportamiento de los crecimientos de anillos determinando su correlación con las variables ambientales en la Sierra Juárez de Oaxaca

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la anchura de los anillos en ambas especies
- Conocer el comportamiento de la precipitación de la región mediante el análisis del crecimiento de los anillos
- Conocer las variaciones del incremento en los anillos en épocas donde se presentaron sequías

3. ANTECEDENTES

3.1. Situación del Manejo Forestal a nivel global

Los esfuerzos de conservación para la protección de los ecosistemas están desafiados por las proyecciones surgidas a raíz del acelerado Cambio Climático (CC) sugiriendo una reestructuración de los regímenes de manejo forestal (Martinelli, 2004). Anteriormente el manejo forestal se centralizaba en el sostenimiento de la producción maderable, con una menor importancia a los factores ambientales (Castañeda, 2000). Los impactos surgidos por el cambio climático propiciaron acuerdos ambientales internacionales como el Protocolo Montreal, Protocolo de Kioto a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, a manera de tomar medidas que disminuyeran las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocadas en su mayoría por los países industrializados; fijando acuerdos para la protección y conservación de las áreas naturales (Rodríguez, 2007).

Una de las estrategias surgidas a nivel global es la ejecución de +REDD+ denotando como una actividad para reducir la deforestación y degradación forestal para favorecer el manejo sostenible mediante la conservación y mejoramiento de carbono forestal potencializando los beneficios sociales y ambientales, en el que muchos países han tenido avances importantes en la preparación e implementación de los proyectos (Calmel et al., 2010). Entonces, el manejo forestal ha mejorado con el fin de mantener de manera ordenada el aprovechamiento, la conservación y el fomento de los recursos forestales, para comprender las dimensiones económicas, ambientales, sociales y culturales a

nivel mundial; logrando con ello el mantenimiento de los recursos para las generaciones actuales y futuras (Aguirre-Calderón, 2015).

3.2. Especies maderables utilizadas en dendrocronología

La anatomía de la madera es de suma importancia para identificar las particularidades que debe de presentar una especie con fines dendrocronológicos y desarrollar una correcta identificación de los anillos (Gutiérrez y Ramos, 2013). En este sentido se contemplan las diversas características anatómicas de la madera, como su densidad de poros, densidad intraanular y contenidos de isótopos, primordiales para la evaluación debido a que de ellos depende la formación de los anillos (Del Valle et al., 2012). Tradicionalmente los estudios dendrocronológicos se han generado en especies de que se distribuyen en las zonas templadas, por esta razón las coníferas son especies destacadas. Debido a que poseen estructura leñosa en la que se logra diferenciar visiblemente la madera temprana y madera tardía; y en el que se ha demostrado una significativa y marcada estacionalidad climática (Schweingruber, 1988). Tan solo en México se reconocen 49 especies de *Pinus* y 161 especies de *Quercus* catalogado como el segundo lugar de diversidad mundial (Gernandt y Pérez, 2014).

Algunos estudios recientes revelaron que las especies que viven en ambientes tropicales también son sensibles a los factores climáticos y, por lo tanto, son adecuadas para las reconstrucciones climáticas. Sin embargo, no permiten desarrollar cronologías que superen los miles de años, debido a la corta longevidad y su baja perseverancia de la madera muerta (Villalba, 2000).

Investigaciones llevadas a cabo en el país han determinado que 52 especies pertenecientes de climas tropicales registran potencial dendrocronológico (Roig et al., 2012).

Según Rojas-García et al. (2020), a nivel mundial en el período 1996 a 2020 las especies utilizadas en técnicas dendroecológicas con fines de implementación para las prácticas de manejo pertenecieron a 118 especies distribuidas en 28 familias; las de mayor relevancia fueron Pinaceae (40), Fabaceae (20), Fagaceae (12) y Cupressaceae (5).

Mediante un análisis detallado de literatura con fines dendrocronológicos de un total de 75 investigaciones de 1996 al 2021 en México, donde se contemplaron reconstrucciones climáticas, especies con potencial dendroclimático, reconstrucciones de incendios y sequías, determinando que la familia con mayor relevancia fueron las Pinaceas con 26 especies. Además de las familias Cupressaceae (4), Fagaceae (1), Oleaceae (1) y Burseraceae (1).

La mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo en la parte norte y centro del país. Algunas de las cronologías superan los 500 años de reconstrucción *Pinus lambertiana*, *Pinus hartwegii*, *Pinus jeffreyi*, *Pseudotsuga menziesii* y *Libocedrus decurrens*, siendo fundamentales para el análisis histórico del clima y la ampliación de la red dendrocronológica, además de ser fuente importante para la construcción del atlas de sequías en México.

3.3. Cronologías dendroclimáticas desarrolladas a nivel global

En la actualidad existen pruebas científicas que revelan que las especies han estado expuestas a los cambios en el clima a lo largo de su vida evolutiva, más

sin embargo actualmente el ritmo de los cambios resalta sobre las fluctuaciones del pasado lo que conlleva al Cambio Climático (Thuiller et al., 2011). Este cambio representa una amenaza latente para el desarrollo sostenible actual y una amenaza grave para el futuro (IPCC, 2014). Ante estos cambios, el clima es una vía resiliente donde se combinan las adaptaciones y la mitigación para alcanzar el desarrollo sostenible mediante la continua evolución a través del tiempo. Actualmente la extensa red de cronologías generadas a partir de los anillos de los árboles y a su prolongación a través del tiempo, ha permitido asociar los cambios de patrones de circulación atmosférica (Briffa, 2000).

A nivel mundial se han llevado a cabo más de 150 reconstrucciones climáticas con un alcance superior a los 2000 años, 80 pertenecen al suroeste de Estados Unidos y 25 a América del Sur, donde se ha demostrado un calentamiento global evidente en las últimas décadas (Martinelli, 2004). Las series desarrolladas para Europa occidental y suroeste y el norte de África, han demostrado la evolución de la temperatura durante el período 1500–1969 d. C. donde observaron claramente la llamada Pequeña Edad de Hielo (Serre-Bachet, 1994). Estudios recientes confirman este mismo suceso logrando explicar mediante observaciones meteorológicas y datos multi-proxys que ocurrió como un proceso natural, el cual se integró a una base de datos denominado Euro-Climhist (Brázdil et al., 2005).

Las cronologías mexicanas han determinado a escala mundial que la señal más impactante es el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur, siendo más sensible al “monzón mexicano” el cuál afecta a la agricultura y ganadería del norte de México (Villanueva et al., 2000). Además, los modelos indican una disminución de la

precipitación en gran parte del territorio (Montero y Pérez, 2008). Estudios recientes han determinado que los bosques templados de México serían los más afectados por el cambio climático con una reducción del 60% y 70% de distribución y las altas temperaturas los harían más vulnerables a incendios forestales (Ibarra y Huerta, 2016). En este sentido, la aplicación de estudios dendroclimáticos proporciona información sobre el comportamiento de los cambios del bosque y los efectos que se han desarrollado a lo largo del tiempo (Rubio-Cuadrado et al., 2018).

3.4. Perspectivas del manejo mediante la dendroecología

Es evidente que la mayoría de los bosques no son naturales y carecen de estudios históricos de las prácticas aplicadas de manejo. Comúnmente las tasas de crecimiento de las especies maderables son obtenidas a través de parcelas permanentes. La utilización de la datación de los anillos identifica de manera directa las edades, evitando las simulaciones logrando ser más precisas (Rojas-García et al., 2020). En parcelas permanentes el monitoreo y el análisis de los anillos refuerzan la información sobre el establecimiento, crecimiento y la mortalidad del bosque (Kitzberger et al., 2000).

En México el uso de núcleos de crecimiento provenientes de inventarios estatales y del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) son una fuente de oportunidad para monitorear los estados de los bosques a escala de paisaje o región (Conafor, 2012). Por tal motivo, la dendroecología representa una fuente importante que puede ser utilizada para responder a los enigmas ecológicos y obtener información e instrumentos aplicables para su buen manejo (Amoroso y

Suárez, 2015). Tomando en consideración que posee un amplio potencial por la gran diversidad de ecosistemas y a la cantidad de especies que presentan anillos de crecimientos anuales, las diferentes etapas de desarrollo y los distintos estados de conservación de los bosques (Zeller et al., 2017).

Para el éxito del manejo de manera sustentable y ordenada se contemplan tres fases primordiales; la fase de planeación, ejecución y monitoreo (Aguirre, 1997). En la fase de planeación forestal las características de las masas forestales deben entenderse a manera de involucrar los riesgos y con ello mantener una visión a largo plazo (Korjus, 2014). Mediante el análisis de los anillos de crecimiento los datos generan información para crear proyecciones en cada especie, establecer el ciclo de corta y planificar su manejo mediante la producción mediante cada uno de los índices de sitio a manera de ordenar los rodales (López et al., 2013). Según Rojas-García et al. (2017), encontraron que la utilización de la dendroecología en el ámbito del manejo forestal en un contexto global mediante la fase de planeación, las prácticas analizadas fueron la estimación del turno y el mantenimiento de estructura y diversidad del bosque.

El análisis dendroecológico de un rodal permite realizar una mejor planeación de las cortas, principalmente por el turno técnico y a la estimación del crecimiento diamétrico que suele ser mayor o menor al turno biológicamente óptimo (Tang et al., 2016). Álvarez (2016), determinó los turnos óptimos de *Pinus ayacahuite*, *Pinus patula*, *Pinus moctezumae*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote* de mayor relevancia en el aprovechamiento forestal distribuidas en Veracruz, los turnos se alcanzaron a la edad de 23, 19, 20, 20 y 19 años respectivamente; para productos de celulosa y trozo corto. Posteriormente determinó el turno de aserrío el cual

contempla diámetros de 30 a 50 cm con fines industriales. El aprovechamiento de la zona veracruzana es generado a las necesidades de la industria, por lo que estos datos mejoran la planificación de los rodales tomando en cuenta los criterios de edad para su aprovechamiento.

En las prácticas de aclareo mediante la fase de ejecución, se observa las diferencias entre el dosel por la suma de luz que reciben los árboles (Stojanović et al., 2017). Sin embargo, el crecimiento de los árboles depende de las interacciones de la competencia y las condiciones ambientales, por tal motivo, la ejecución de aclareos ocasiona cambios en la competencia por el recurso agua y nutrientes que modifican las propiedades de la madera (Rojas-García et al., 2020). Tal es el caso de Hernández et al. (1996), donde encontraron como respuesta de *Pinus patula* al aclareo un aumento en la anchura del anillo, una reducción en el crecimiento de la madera tardía y una densidad en la madera de 2-5%. Ligot et al. (2019), menciona que la dendroecología es un método verídico en que se pueden desarrollar mediciones de árboles+ dominante y codominantes con fin de observar la evolución de las prácticas aplicadas. Zeller et al. (2017), determinaron la densidad de la madera de dos especies dominantes y el ancho de los anillos en rodales puros y mixtos, donde los árboles de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) fueron en promedio, un 14% más ancho en rodales mixtos y haya europea (*Fagus sylvatica*) no difirió entre ambos rodales. Sin embargo, la densidad de los anillos fue menor en los rodales mixtos de pino silvestre (-12%) y haya europea (-8%).

Dentro del monitoreo del manejo forestal se considera una continua retroalimentación que permite ajustar las actividades para reducir las

incertidumbres ocasionadas por las mismas. Una inapropiada aplicación de manejo puede ocasionar severos problemas a las áreas que se encuentran bajo aprovechamiento, ocasionando diferencias en la estructura arbórea y en la fragmentación que propician una salud negativa y baja productividad de los ecosistemas (Torres-Rojo, 2004). Algunos eventos de mortalidad determinados mediante el análisis de tocones de árboles muertos inducidos por perturbaciones humanas como los incendios acompañados de las altas sequías son identificados en el crecimiento radial del arbolado y sirven como guías de la fragilidad a futuros casos de mortalidad (Vanoni et al., 2019). Las afectaciones por insectos ocasionadas por las sequías en España indujeron a un menor crecimiento del arbolado influenciado por la acelerada acción de los perforadores y a las altas temperaturas presentadas en el año 2012. Los *Pinus halepensis* muertos presentaron los mismos patrones de crecimiento a los vivos, por lo que atribuyeron que los árboles que son atacados por los insectos con sequías simultáneas son incapaces de afrontarlo y generan una perturbación significativa al ecosistema. Tal es el caso del ataque de plagas en la población de *Pinus pseudostrabus* donde encontraron cambios en la composición de especies, ocasionando la alteración del ciclo de nutrientes y la salud hidrológica de las zonas ribereñas (Schulz et al., 2018).

En la producción de semillas y su relación con el crecimiento anual Lucas-Borja et al. (2018), determinaron que la alta producción de semillas tuvo un efecto negativo en el ancho de los anillos de *Pinus nigra* al ser regulada por el clima de los 2 a 3 años anteriores, resultando como una especie sobresaliente con fines de manejo en escenarios de cambio climático.

Mediante la reconstrucción del crecimiento de una población se reconocen los eventos de liberación y supresión de los árboles, generando efectos enfocados a comprender los distintos regímenes de manejo (Allen et al., 2019). En bosques de *Austrocedrus chilensis* Losada et al. (2018), reconstruyeron procesos de los cambios que ocurrieron en los últimos 70 años, que permitieron conocer el establecimiento de nuevos árboles, la dinámica transitoria del desarrollo y su agrupación con la disminución de la cobertura del dosel son parte del resultado del decaimiento y la mortandad de los árboles en la etapa adulta. permitiendo interpretar el establecimiento de los nuevos individuos, la dinámica temporal del crecimiento y su asociación con la pérdida de cobertura del dosel resultado del decaimiento y mortalidad de los individuos adultos. Determinando que el futuro desarrollo de estos bosques será de masas disetáneas mixtas con estructuras más complejas codominadas por dos especies distintas a los bosques coetáneos actuales. Por tanto, la información obtenida a través de los estudios dendroecológicos, en las diferentes etapas de manejo permiten proyectar la estructura y composición en un determinado tiempo (Zeller et al., 2017).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en Santa María Jaltianguis, ubicado al norte de la Sierra Juárez del Estado de Oaxaca (Figura 1). La vegetación de los sitios pertenece a bosques de coníferas dominado por el bosque de pino y pino-encino. Presenta un clima templado subhúmedo con lluvias principalmente en verano y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperaturas de 26 a 32°C y con una precipitación media anual de 1448 mm. El suelo presente en el área de estudio pertenece al grupo de Acrisoles (Aquino et al., 2025). Los sitios de recolección de las muestras se ubicaron en áreas específicas de distribución donde la población dominante es de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus hartwegii* Lindl, a una altitud de 1700 a 3100 msnm.

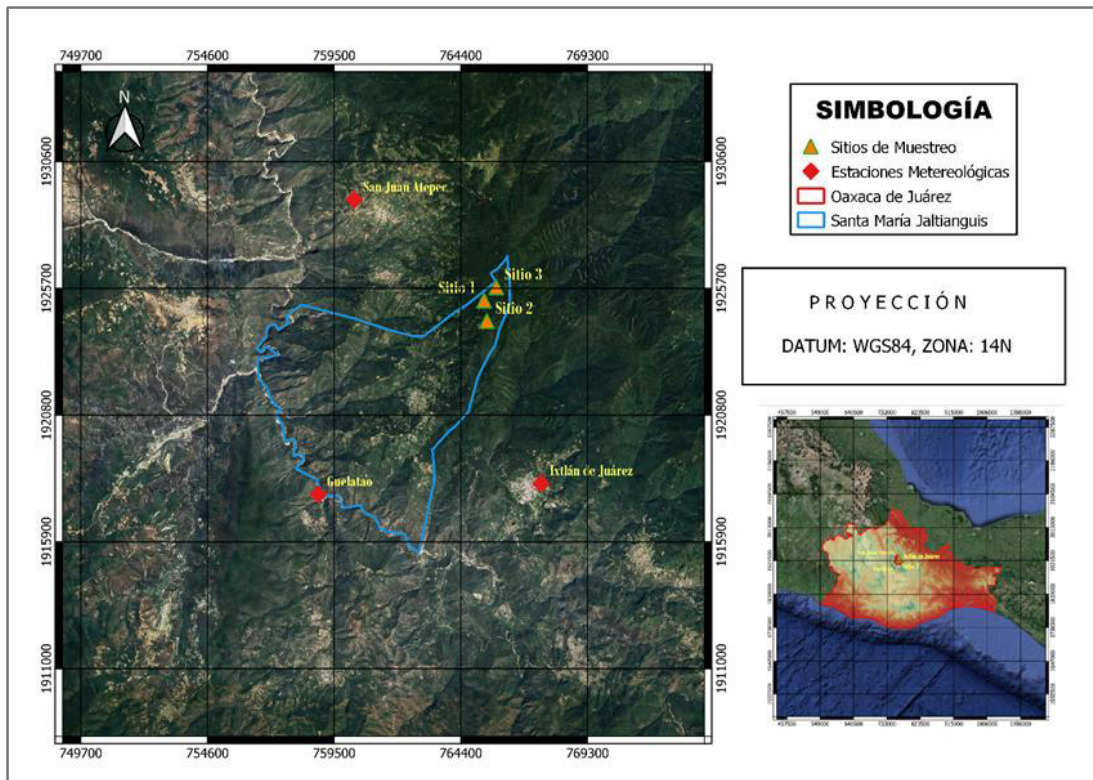


Figura 1. Área de muestreo en el municipio de Santa María Jaltianguis, Oaxaca.

Santa María Jaltianguis es un municipio que consta de 45.93 km², al norte colinda con San Juan Evangelista Anasco y San Juan Atepec, en la zona sur con Ixtlán de Juárez, al oeste se encuentran los municipios de Teococuilco de Marcos Pérez, Santa Ana Yareni y San Miguel del Río. Esta habitado por 499 personas a un nivel del mar de 2100 msnm.

4.2. Muestreo

El tipo de muestreo que se utilizó fue mediante un muestreo selectivo en que se consideraron individuos longevos bien conformados. Estos individuos deberán estar libres de plagas y enfermedades con un fuste recto con un diámetro superior a 30 cm. Además, se ubicaron en tres micrositos que maximicen la señal climática

(suelos someros, pendientes pronunciadas y de baja fertilidad). Estos muestreos abarcaron de 2000 a 3100 msnm, con una mayor frecuencia a 3000 msnm.

El periodo de recolecta de los núcleos o virutas de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus hartwegii* fue durante junio y julio de 2020.

4.3. Toma de muestras en campo

Las muestras se colectaron por medio del método no destructivo, con el uso del barreno de Pressler marca Haglöf con dimensiones de 5.15mm /0.200" de diámetro interno, con 3 filos internos. De cada individuo muestreado se obtuvieron dos o tres muestras a la altura de 40 cm a nivel del suelo, evitando la compresión y tensión en la formación de la madera. Una vez que se obtuvieron las muestras se guardaron en tubos plásticos para evitar la ruptura de las virutas con el fin de conservar completamente la muestra ya que suele ser muy frágil.

4.4. Señal expresada de la población (EPS)

El paquete dplR genera posibilidades de evaluar la calidad de una cronología, puesto que entrega resultados estadísticos como la señal expresa de la población (EPS), la cual es una medida de confianza de señal común entre muestras (se puede expresar como una proporción de la varianza total de la cronología), cuando esta alcanza un valor mayor a 0.85, significa que a partir de ese año la cronología posee fiabilidad (Wigley et al., 1984).

4.5. *Pinus hartwegii*

La especie *Pinus hartwegii* es una especie que se ha adaptado a los bosques de México, donde ha conseguido ser parte importante en el desarrollo de su ecología

en los sitios donde se localiza. Además, la especie cuenta con capacidad para desarrollarse en suelos pobres y con resistencia a las adversidades de las condiciones climáticas logrando con ello una valiosa especie para su uso en la conservación y restauración de los ecosistemas.

4.6. *Pinus pseudostrobus*

Pino ocote (*Pinus pseudostrobus* Lindl) se considera una especie con una amplia flexibilidad morfológica y fisiológicamente; además de una alta distribución que responde a las fluctuaciones ambientales (Márquez y Mendizábal, 2004; Espinosa et al., 2009). A pesar de ello, en el país existen escasas investigaciones dendrocronológicas que consideran a la especie para modelar las fluctuaciones hidroclimáticas (Constante, 2009; Marlès et al., 2014; González, 2019).

4.7. Toma de muestra de *Pinus hartwegii*

Pinus hartwegii es considerada una especie que se encuentra a alturas superiores a los 2800 a 3100 msnm en la región. Las muestras se obtuvieron a altitudes de 2900 a 3100 msnm. La cantidad de muestras obtenidas para el análisis de esta especie fue de un total de 66 muestras.

4.8. Toma de muestra de *Pinus pseudostrobus*

Se extrajo un total de 48 muestras pertenecientes de 24 árboles longevos, dichos especímenes se encontraban libres de enfermedades y plagas, daños mecánicos y con poco disturbio por aprovechamientos forestales. De tal manera que se obtuvieron dos muestras o virutas con apoyo de taladros de Pressler a una altitud de 0.40m sobre el suelo, evitando la tensión y compresión en la madera (Speer,

2010). La distribución de toma de muestras de la especie fue con individuos localizados entre 2000 a 2800 msnm.

4.9. Preparación de muestras de laboratorio

Las muestras se colocaron y pegaron sobre molduras de madera, dejando reposar por dos días. Posteriormente se pulieron con diferente granulación de lija de 220 a 1500 para lograr una mejor visibilidad de los anillos de crecimiento siguiendo los métodos estándares determinados por Fritts (1991).



Figura 2. Vista de los anillos de crecimiento con el pulido.

Todas las muestras fueron etiquetadas con diferente numeración acorde a la especie muestreada. En cada una de las muestras pulidas se identificó el patrón de manera visual los crecimientos en el que se realizó las gráficas conocidas como “Skeleton plot”. Es una manera subjetiva de representar el grosor de los anillos que facilita determinar el patrón de crecimiento.



Extracción de muestras en campo



Secado por dos días de las muestras para su montaje



Montaje y pegado de muestras



Pulido de las muestras para su mejor visualización

Figura 3. Etapas y tareas del estudio dendrocronológico. A) Muestreo con barrero de Pressler, B) Extracción del testigo con el barreno de Pressler, C) Montaje de muestras en molduras de madera y D) Pulido mediante lijas de diferente granulometría hasta la visualización adecuada de los anillos.

4.10. Análisis de laboratorio

El crecimiento de los anillos anuales de cada uno de los núcleos se midió a través de un sistema de medición Velmex de precisión 0.001 mm, donde se consideró la longitud de madera temprana (EWI), madera tardía (LWI) y anillo total (RWI) (Villanueva et al., 2018; Grissino, 2001). Adicionalmente se realizó el control de calidad con el programa COFECHA que consta en conocer la correlación más alta

entre series de crecimiento, al correlacionar en subperíodos de 50 años y traslapes de 25 años (Holmes, 1983).

La calidad del fechado se determinó mediante el análisis en el programa que contrasta la correlación entre conjunto de las series en segmentos de 50 años, con traslapes entre secciones de 25 años (Holmes, 1983; Grissino, 2001). El procedimiento permitió puntualizar de manera más exacta el fechado de cada anillo de acuerdo con el año exacto de su formación.

4.11. Desarrollo de la cronología

Mediante el programa de COFECHA, donde se verificó la calidad de la serie y la sincronización “Cross-dating”, obteniendo la serie media la cual es denominada Serie Maestra con la que se compararon las series individuales mediante un análisis de correlación para encontrar los posibles errores originado en el “Cross-dating” y con ello descartar series o validarlos.

Con el objetivo de eliminar las tendencias de crecimiento y factores ambientales no relacionado con el clima se realizó una estandarización previa de la medición del ancho de los anillos de crecimiento con ayuda del programa ARSTAN y así determinar el potencial dendrocronológico.

Se aplicó una doble estandarización de los anillos de crecimiento para mejorar el ajuste, que consistió en una curva suavizada cúbica que preservara 50 % de la varianza contenida en las series. Se dividió el ancho de anillo dividido entre el valor de la curva de ajuste, transformando los incrementos en índices de ancho de anillo

(IAA), mismo que permitieron comparar las series de crecimiento de edades diferentes.

Con los valores de IAA se generó una cronología por año, utilizando la cronología estándar y residual de ARSTAN. De acuerdo, con Contreras-Mata et al. (2024) estos estadísticos permiten eliminar los efectos endógenos originados por la perturbación del rodal y maximizar la señal climática común contenida en los anillos de crecimiento.

La cronología de cada elemento analizado (EWI, LWI y RWI) incluyó las versiones estándar (Std) y residual (Rsd), convenientemente se procedió a determinar la relación con las variables ambientales.

4.12. Análisis estadístico

La asociación climática de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus hartwegii* fue determinada con una correlación de Pearson entre las cronologías estandarizadas de EWI, LWI y RWI. Las variables consideradas fueron precipitación promedio (mm), temperatura mínima y temperatura máxima (°C). En cuestión de una mejor precisión se realizaron correlaciones mensuales y acumuladas promedio.

4.13. Obtención de datos climáticos

Los datos de precipitación promedio (mm), temperatura máxima y temperatura mínima (°C), que se utilizaron en el índice de ancho de anillo obtuvieron a través de procesos de regresión múltiple en el software Eric III (IMTA, 2013; Aquino-Ramírez et al., 2019). Los registros de las tres estaciones se promediaron para la

construcción de una base local donde se logró abarcar un periodo de 1955 a 2002, utilizada en el análisis de correlación con el índice de ancho de anillo (Cuadro 1).

Estación	Latitud N	Longitud W	Altitud (m)	Periodo (años)	% Datos
Ixtlán de Juárez	17.3	-96.4	2312	1955-2002	96.5
San Juan Atepec	17.4	-96.5	1975	1970-2002	100
Guelatao	17.3	-96.6	1496	1976-2000	93.6

Cuadro 1. Estaciones climáticas analizadas en el estudio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Cronología

Para la especie *P. pseudostrobus* se lograron fechar 43 muestras (88%) que corresponden a 24 árboles de un total de 48 muestras, el resto no se logró datar. En el caso de *P. hartwegii* fue un total de 66 núcleos pertenecientes a 45 árboles, lo que corresponde un 86.8% de la muestra total analizada. El resto de los núcleos se descartó ya que presentaron anomalías en el crecimiento, debido a la presencia de secciones con compresiones de anillos y con pulsos de liberación que no permitieron identificar el principio y fin de los anillos (Urquijo et al., 2022).

Los resultados obtenidos en COFECHA revelaron una correlación entre series significativamente alta de *P. pseudostrobus* de $r=0.59$ y *P. hartwegii* $r=0.54$ ($P<0.01$), por lo que ambas especies poseen un alto potencial dendrocronológico para la reconstrucción de eventos climáticos (Acosta-Hernández et al., 2017).

En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos del programa COFECHA.

Cuadro 2. Resultados estadísticos generados por el programa COFECHA para el ancho de anillos de *P. hartwegii*.

Estadísticos	Valores obtenidos	Rango (Astudillo-Sánchez et al., 2016)	Rango (Manzanilla-Quiñones et al., 2020)
Número de series fechadas	66	104	78 ¹ , 26 ² y 25 ³
Intercorrelación entre series	0.57	0.50	0.58 ¹ , 0.51 ² y 0.41 ³
Serie maestra	201 años (1818-2019)	307 años (1705-2012)	147 años (1869-2016) ¹ 158 años (1858-2016) ² 142 años (1874-2016) ³
Sensibilidad media	0.31	0.32	0.31 ¹ , 0.24 ² y 0.23 ³
Promedio de ancho de anillos	105 años	---	---
Desviación estándar de ancho de anillo	0.21	---	---
Autocorrelación de primer orden	0.39	---	0.24 ¹ , 0.10 ² y -0.15 ³
Relación señal ruido	12.15	---	9 ¹ , 12 ² y 18 ³
Señal expresada de la población (EPS)	0.86	0.85	0.80

¹ = Nevado de Colima, ² = Nevado de Toluca y ³ = Pico de Orizaba (Manzanilla-Quiñones et al., 2020). --- Sin datos.

De acuerdo, con Díaz-Ramírez et al. (2016) los resultados anteriores superan los parámetros generados por diversos estudios en especies de coníferas. Específicamente, para *P. hartwegii* la intercorrelación entre series es notoriamente más elevada comparada con los resultados obtenido por Astudio-Sánchez et al. (2016). De mismo modo para *Pinus pseudostrobus*, la sensibilidad media de 0.42, autocorrelación de primer orden de 0.26, desviación estándar de 0.22 y la relación señal-ruido de 17.42. La cronología presentó confiabilidad superando el umbral a partir de 1942, con valor de EPS (0.96) con más de 10 radios (Wigley et al., 1984).

La extensión de la serie dendrocronológica del anillo total de *Pinus hartwegii* fue de 1810 a 2020 (210 años de longitud), el periodo más apropiado para la reconstrucción climática (confiabilidad cronológica) se extiende de 1888 a 2020 y presenta más de 10 radios, con un EPS de 0.86 superando el umbral de 0.85 (Wigley et al., 1984). Manzanilla-Quiñones et al. (2020) señalan que EPS se evalúa en un rango de 0 a 1, por tanto, valores superiores a 0.80 se consideras aceptables y recomendables (Figura 4).

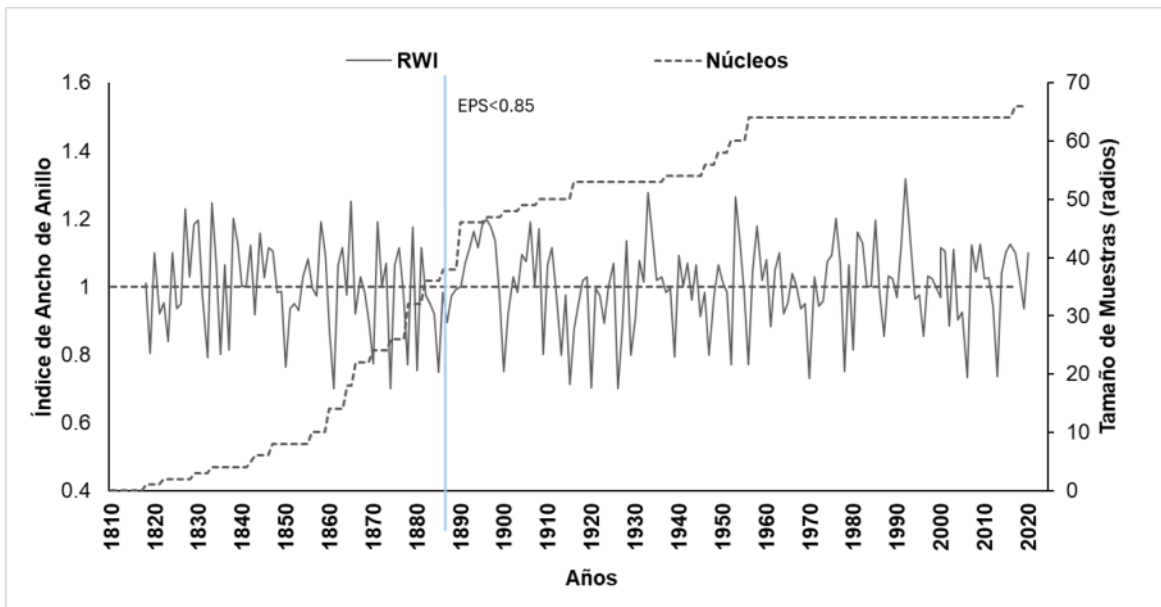


Figura 4. Cronología residual de anillo total (RWI) *Pinus hartwegii* Lindl (línea continua) y tamaño de muestra (línea punteada). La línea en color azul indica la fecha a partir de donde la cronología rebasa el valor de EPS de 0.85. La línea negra discontinua representa el umbral para un nivel de confianza significativo ($p < 0,05$)

En el caso de *Pinus pseudostrobus* las cronologías generadas de madera temprana, madera tardía y anillo total se extendieron por un periodo de 1910 a 2018 (108

años). La cronología residual de anillo total demostró una correlación entre series de 0.59 ($p < 0.01$), encontrándose dentro de los valores obtenidos en otras investigaciones en el país para la especie (Marlès et al., 2014; Constante, 2009; González, 2019) (Figura 5).

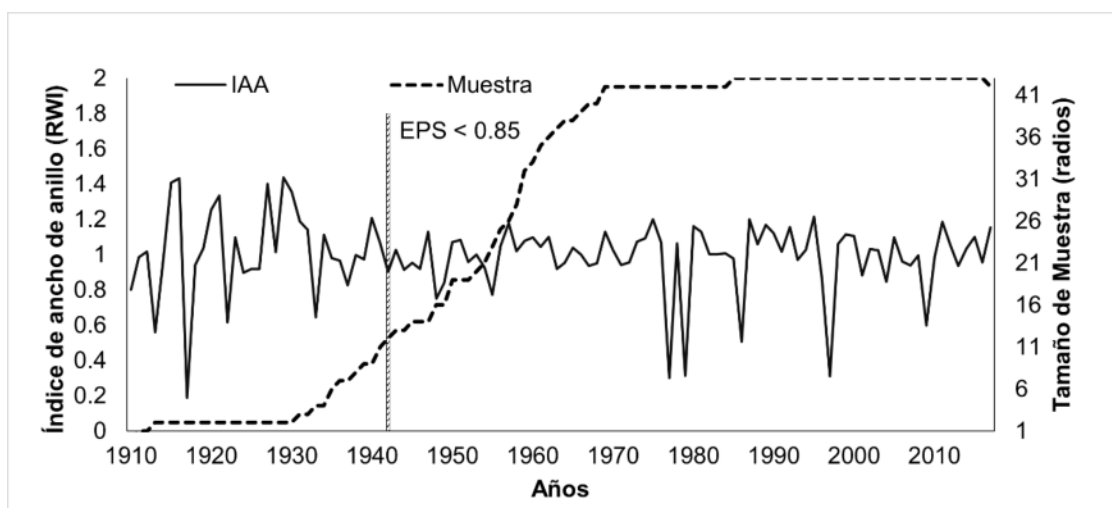


Figura 5. Cronología residual de índice de ancho de anillo total para *Pinus pseudostrobus* Lindl.

5.2. Función de respuesta de *Pinus hartwegii*

5.2.1. Anillo total

En general la correlación de la cronología residual de la precipitación con el ancho del anillo total de *Pinus hartwegii* se comportó negativamente en los meses de junio, julio, septiembre y diciembre (-0.11, -0.03, -0.04 y -0.43); el resto de los meses fue positiva, siendo el mes de diciembre el más significativo (Figura 6). De esta manera su asociación con el crecimiento radial fue muy similar (Figura 7).

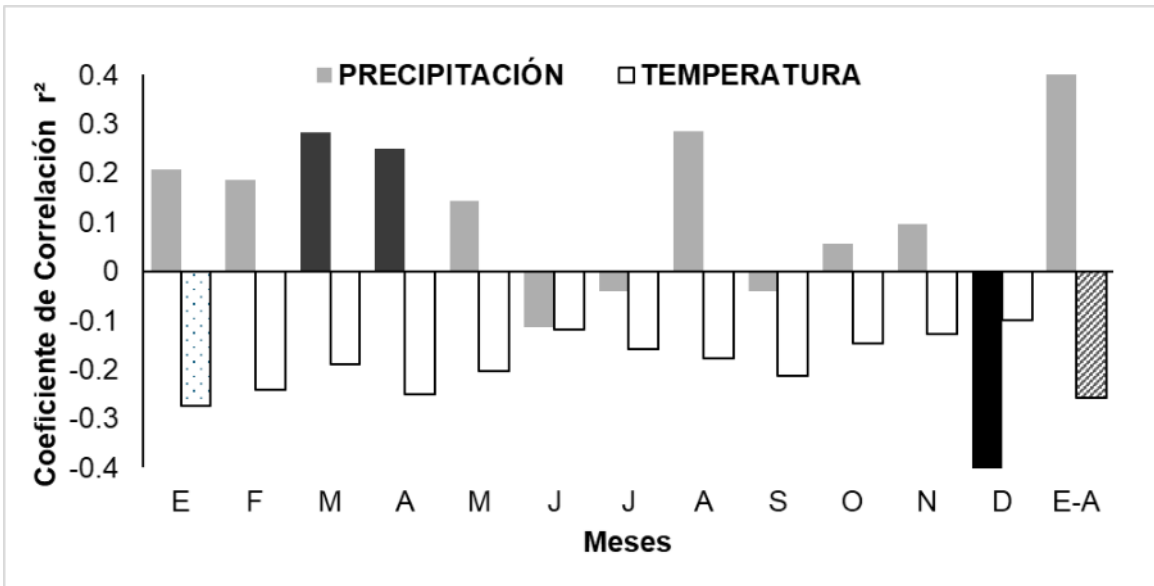


Figura 6. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación con el ancho del anillo (RWI) de *Pinus hartwegii* para el período 1955-2002.

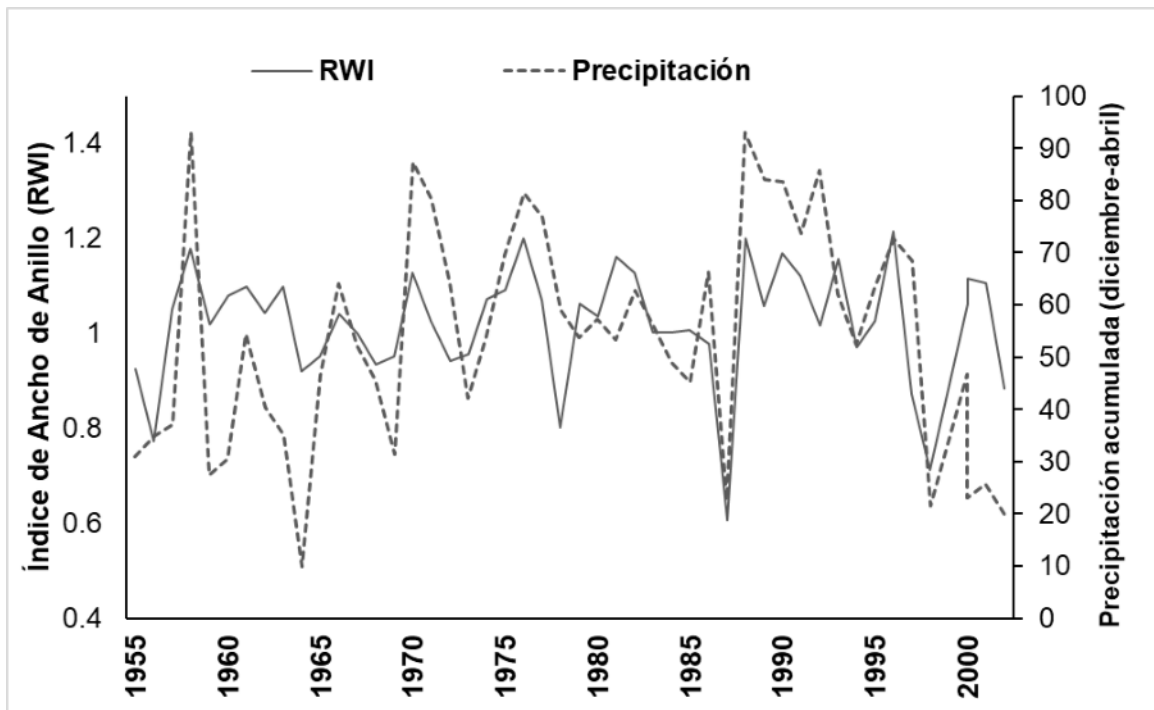


Figura 7. Asociación entre el índice de anillo total y la precipitación acumulada diciembre-abril con registros de las estaciones meteorológicas en el período 1955-2002.

5.2.2. Correlación de Madera temprana

En relación con la madera temprana está presento un comportamiento similar con la precipitación, a excepción de septiembre; la temperatura se relacionó con los registros del mes de abril (-0.38) (Figura 8).

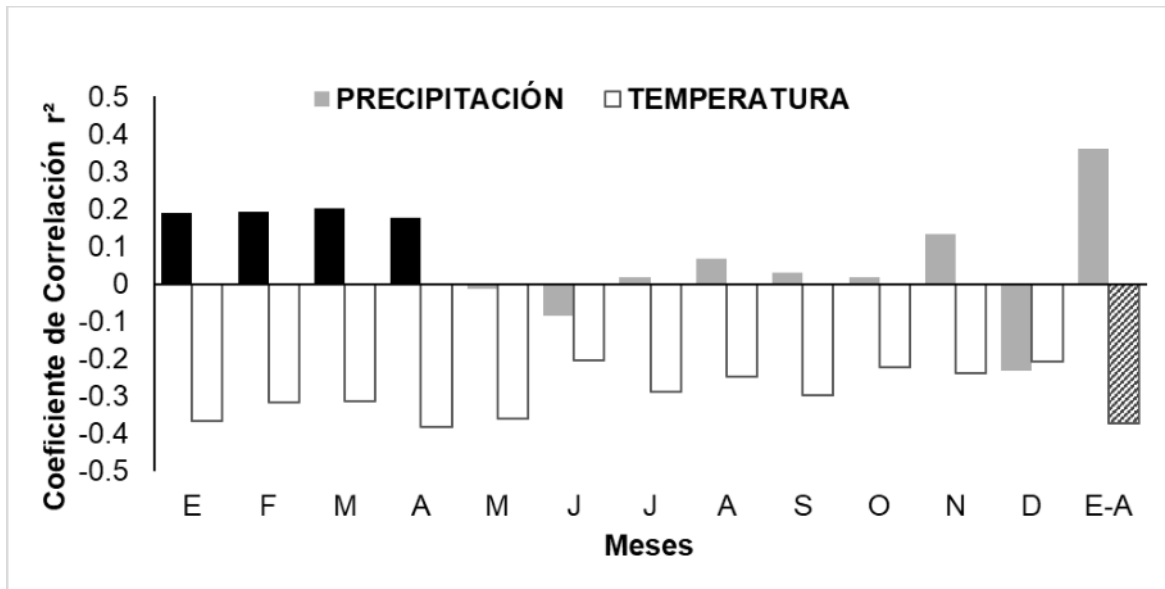


Figura 8. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación y temperatura con la madera temprana (EWR) para el período 1955-2002.

5.2.1. Correlación de Madera tardía

Por último, la madera tardía se relacionó positivamente con la precipitación a excepción de los meses de mayo, noviembre y diciembre (-0.02, -0.07 y -0.24), en cuanto a la temperatura fue negativa en todo el año y observada por el mes de abril (-0.38) (Figura 9).

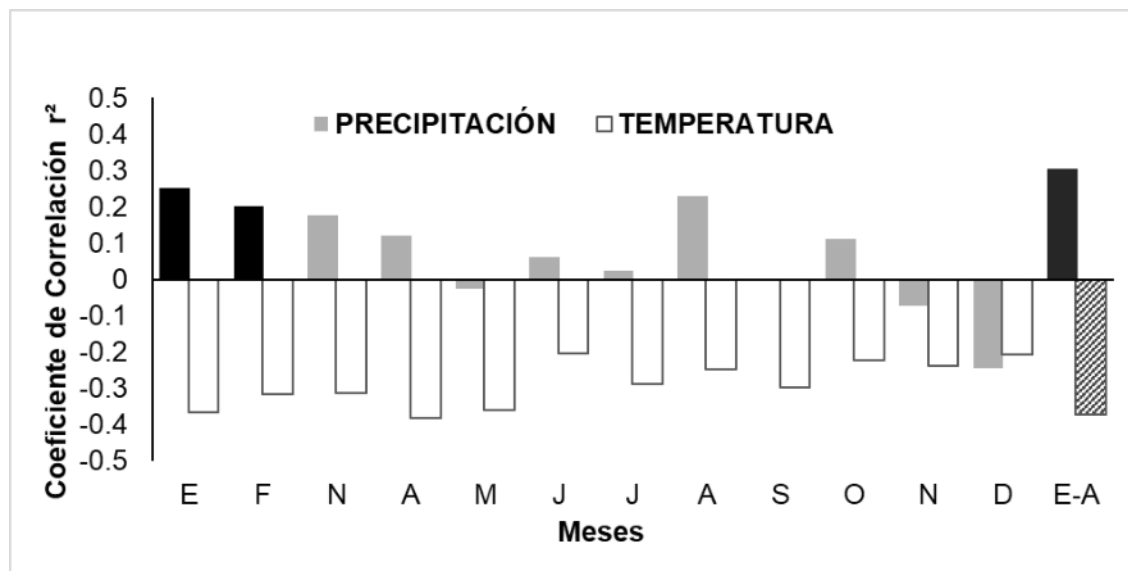


Figura 9. Función de respuesta de la cronología residual de la precipitación y temperatura con la madera tardía (LWR) para el período 1955-2002.

En general, la precipitación estacional acumulada entre los meses de enero y abril generó una correlación significativa con la cronología residual de las tres variables analizadas, particularmente para el ancho de anillo presentó una correlación negativa significativa con la precipitación ($r=0.54$), para madera temprana ($r=0.36$) y madera tardía ($r= 0.31$) fue significativamente positiva. Los resultados coinciden con Astudillo-Sánchez et al. (2016) para *P. hartwegii* en el Nevado de Toluca y Monte Tlaloc donde encontraron un patrón de relaciones entre el clima con el crecimiento de árboles con asociaciones positivas con la precipitación y negativas con la temperatura, acentuando una relación más fuerte entre precipitación y crecimiento de la especie.

Por otra parte, las correlaciones residuales de la temperatura máxima de los meses enero-abril con el anillo total ($r=-0.26$), madera temprana ($r=-0.37$) y madera tardía (-0.37) fueron significativamente negativas ($p<0.05$). Estas asociaciones con el

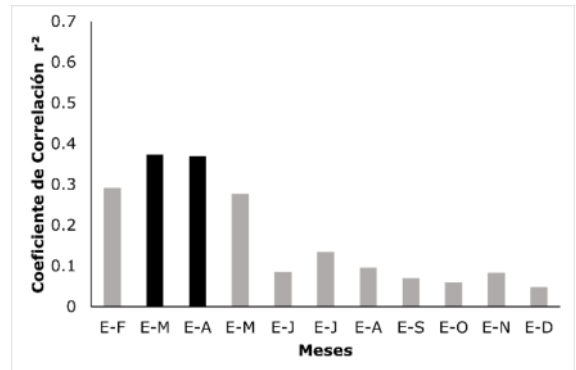
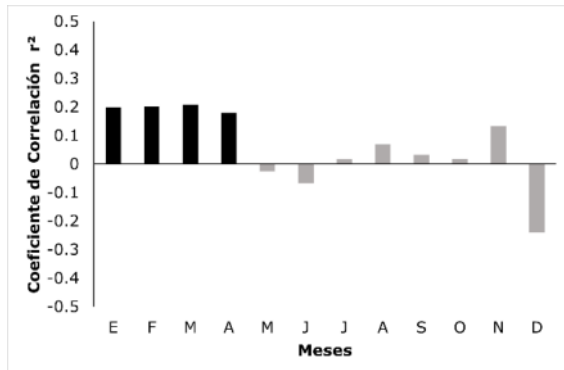
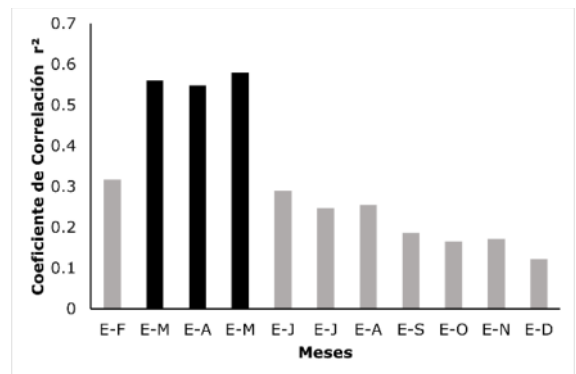
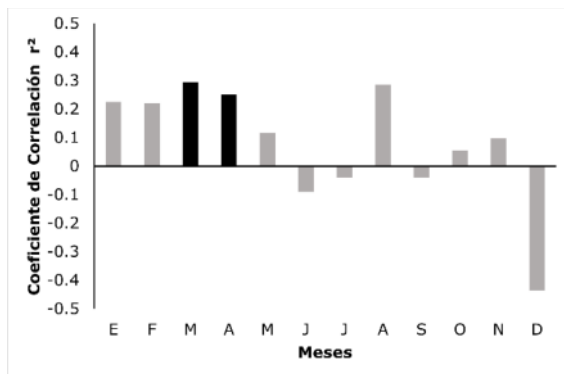
crecimiento de anillo total, madera temprana y tardía se ha reportado por diversos autores donde desarrollaron redes dendrocronológicas en coníferas (Selem et al., 2015; Villanueva et al., 2015; Villanueva-Díaz et al., 2018).

Los datos de la cronología estándar del anillo total; señalan que las precipitaciones de diciembre a abril en el periodo 1955 -2002 (0.54 $p < 0.01$) explican hasta en un 54% los crecimientos anuales de *P. hartwegii* (Figura 13). Los resultados presentaron una similitud respecto a Manzanilla-Quíñonez et al. (2020) quienes reportan un 53% de variación en el mes de diciembre para *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba en Veracruz. Además, se ha reportado que el crecimiento de *P. hartwegii* inicia en el periodo de marzo a abril y termina en octubre-noviembre (Biondi et al., 2005). En este sentido, Aquino et al. (2019) mencionan que en los primeros meses del año es donde se registran las correlaciones más significativas con el crecimiento radial de las pináceas, coincidiendo con los resultados del presente análisis dendrocronológico. No obstante, el aumento de la temperatura repercute en el crecimiento radial (Lo et al., 2010). Por mencionar, Astudillo-Sánchez et al. (2019) reportan que en México el aumento de la temperatura fue beneficioso para el crecimiento de *P. hartwegii*. La relación del crecimiento radial indica una asociación que se regulariza y limita principalmente con la disponibilidad de la lluvia en la estación invierno-primavera dado que se presenta con una intensidad apropiada para retener humedad en los suelos. Díaz-Ramírez et al. (2016) indican que la precipitación influye hasta en un 52% sobre el crecimiento radial. Esto ha sido documentado en diversos análisis dendrocronológicos en Norteamérica (Gutiérrez-García y Ricker, 2019; Cerano-Paredes et al., 2014; Aquino et al., 2019; Manzanilla-Quíñonez et al., 2020).

5.3. Precipitación *Pinus pseudostrobus*

La etapa con correlación positiva significativa entre la cronología de anillo total residual y los datos climáticos de la precipitación mensual ($p < 0.01$) fue en marzo y abril. De la misma forma, la cronología de madera temprana de enero a abril y por último la cronología de madera tardía en enero y febrero, lo que determina que el desarrollo de la especie responde durante invierno-primavera (Figura 10).

La precipitación acumulada presenta asociación en los diferentes anchos de anillos en el periodo enero-abril lo que ha sido determinado en otros estudios por la misma especie (Marlès et al., 2014).



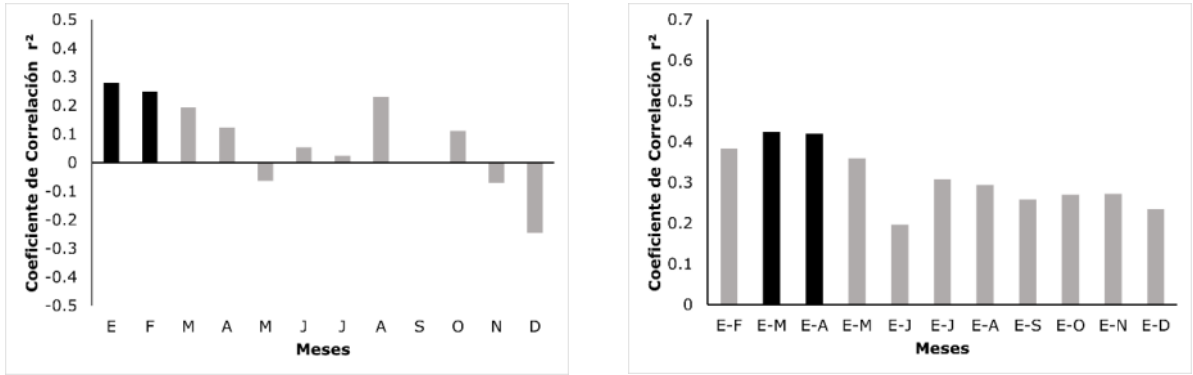
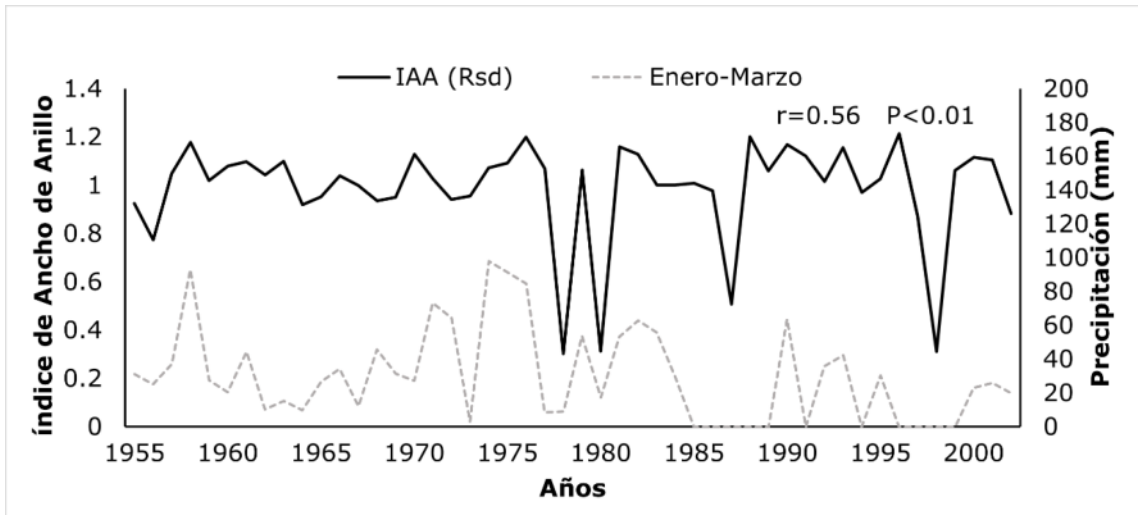


Figura 10. Coeficiente de correlación entre la precipitación mensual y acumulada (1910 a 2018) y los índices de RWI, EWI y LWI. Las correlaciones significativas ($P < 0.01$) están representadas con barras en color negro.

La asociación de los índices de ancho de anillo con la precipitación acumulada en los meses de mayor relación significativa con el anillo total fue en el periodo enero-marzo, madera temprana en enero-abril, y madera tardía enero-marzo ($p < 0.01$) con $r = 0.56$; $r = 0.42$; $r = 0.37$ (Figura 11).



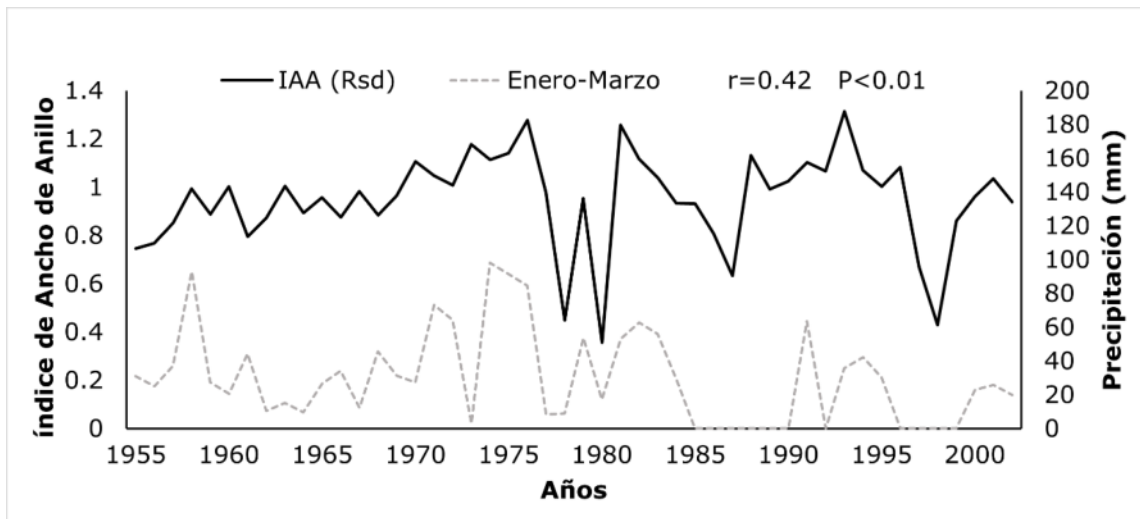
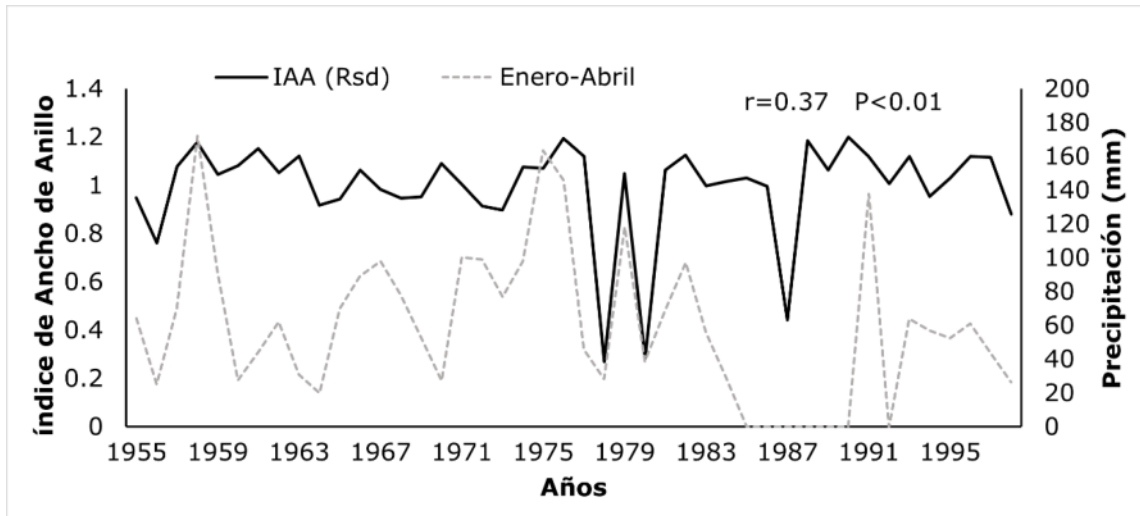


Figura 11. Relación entre el índice de ancho de anillo (RWI, EWl y LWI) y precipitación estacional observada.

La especie presenta potencial para reconstruir la precipitación en las estaciones de invierno-primavera con un coeficiente de correlación mayor con el anillo total, semejante a lo documentado en el norte y centro de México por la misma especie por diversos investigadores (Marlès et al., 2014; Constante, 2009; González, 2019), demostrando una mayor variabilidad de la lluvia estacional.

5.4. Temperatura *Pinus pseudostrobus*

La temperatura mínima obtuvo una mejor correlación con la madera temprana en el mes de septiembre (Figura 12; $r=-0.45$, $P<0.001$). Ya que se considera que al presentarse temperaturas cercanas a 5 °C o por debajo, genera que los estomas cierren ocasionando la interrupción de intercambio de gases (Barceló, et al., 2001). Casos similares se han descrito con *Abies guatemalensis* por Aquino-Ramírez, et al. 2019; donde se correlaciona negativamente con el crecimiento de la madera temprana, con correlaciones de -0.28.

Cuadro 3. Resumen de las correlaciones significativas de temperatura mínima (T_{mín}) y temperatura máxima (T_{máx}).

Cronología	Versión	Variable	Periodo mensual/	Asociación
		climática	estacional	
RWI	Estándar	T _{mín}	Mayo	-0.36
		T _{máx}	Abril/Mayo	-0.34
EWI	Estándar	T _{mín}	Septiembre	-0.45
		T _{máx}	Abril	-0.26
LWI	Estándar	T _{mín}	Diciembre	0.27
		T _{máx}	Enero/Mayo	-0.37

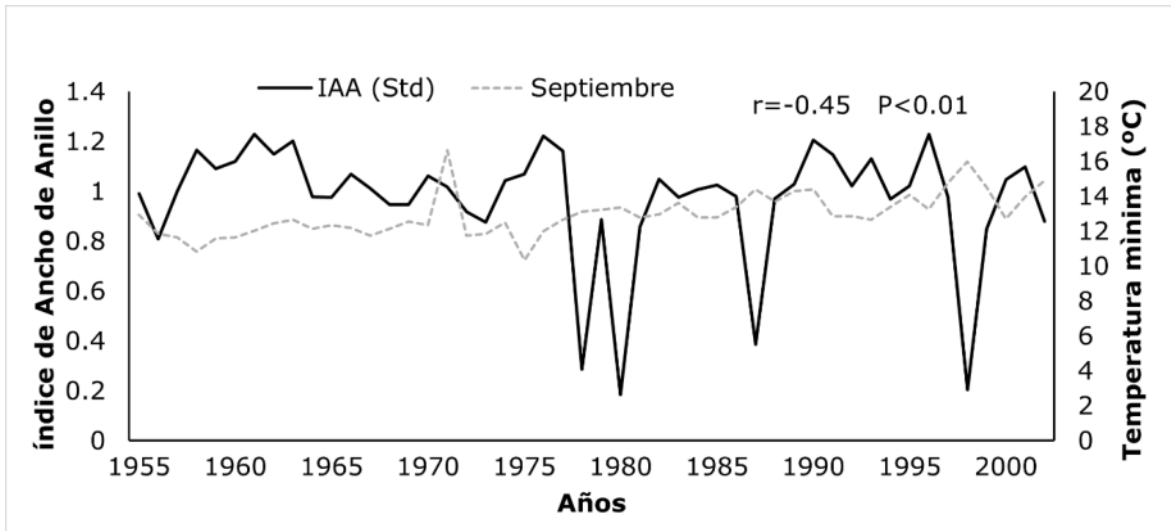


Figura 12. Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de madera temprana de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura mínima promedio.

Al relacionar la temperatura máxima promedio generada en el periodo estacional enero-mayo con las cronologías de anillo total y madera temprana, se correlacionó significativamente de manera negativa con el crecimiento de la madera tardía ($r = -0.37$; $P < 0.005$), es decir, a mayor temperatura menos crecimiento (Figura 13).

Esta relación inversa en el crecimiento de los anillos con el aumento en la temperatura ha sido observada en Bolivia en la especie *Polyjepis pepeii* por Roig et al, 2001; en Michoacán con *Pinus pseudostrobus* Marlés et al, 2014 y López-Hernández et al., 2018, en Chiapas con *Pinus oocarpa* concluyendo que las temperaturas de verano afectan el crecimiento de la madera tardía. Escenario que genera una acelerada evaporación del agua que se encuentra retenida en el suelo y limita el crecimiento de la madera temprana (Fritts, 1976).

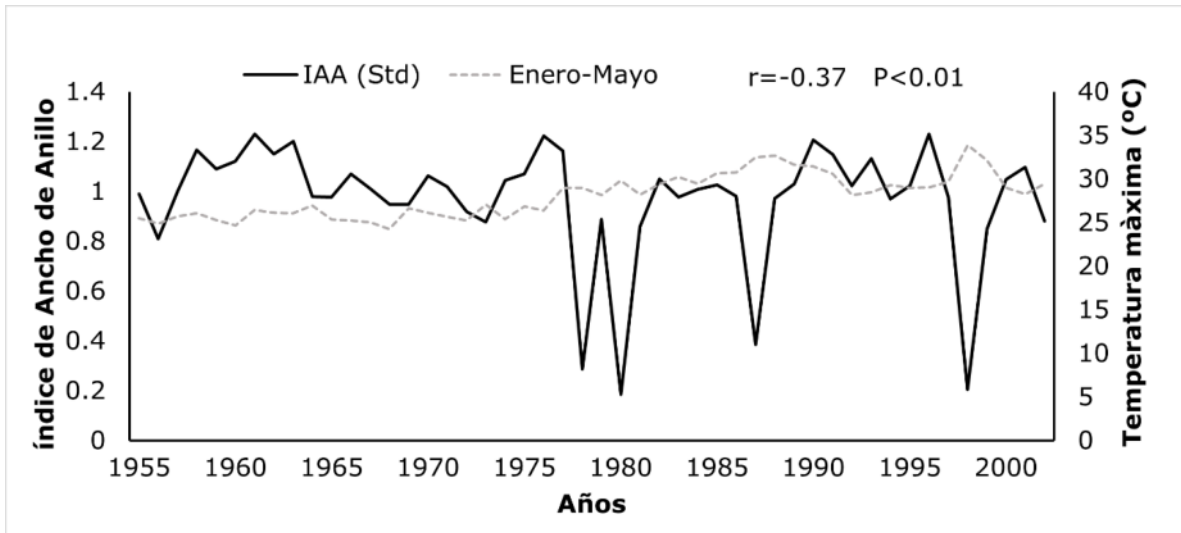


Figura 13. Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura máxima promedio.

5.5. Años secos

Los periodos donde se presentaron años más secos de acuerdo con el registro de los anillos en ambas especies analizadas fueron en 1832, 1837, 1843, 1850, 1861, 1870, 1878, 1880, 1885, 1900, 1915, 1920, 1927, 1929, 1930, 1939, 1943, 1952, 1956, 1961, 1970, 1978, 1998 y 1999. Algunas de las sequias de mayor intensidad en el país observadas en el norte de México concuerdan con las observadas en esta investigación, dichas sequias propiciaron la disminución de los recursos afectando a la cosecha de los alimentos necesarios para subsistir (Constante García et al., 2009).

5.6. Años húmedos

Los años de mayor humedad registrados en el ancho de los anillos fue en 1820, 1827-1830, 1833, 1834, 1838, 1839, 1844. 1847, 1854, 1855, 1862. 1863, 1871, 1872, 1879, 1881, 1891-1897, 1906, 1908, 1918, 1919, 1928, 1933, 1934, 1940, 1944, 1949, 1953, 1957, 1958, 1962, 1963, 1971, 1981-1985, 1991-1993, 2000, 2001, 2011 y 2015. El periodo más concurrente en otras investigaciones menciona que se propició de 1966 a 1994 caso similar a lo encontrado en esta investigación donde los años se mantuvieron casi continuos con la presencia de lluvias fuertes; en Chihuahua se consigna este mismo periodo (Díaz *et al.*, 2002).

6. CONCLUSIONES

P. hartwegii y *P. pseudostrobus* presentan potencial dendrocronológico, respaldado por los resultados del presente estudio donde aporta información cronológica de 201 años (1818 a 2019) y 103 años (1910-2019) respectivamente, sobre el

crecimiento radial de la especie, determinado por las variables climáticas, precipitación y temperatura.

El ancho total, madera temprana y tardía de los anillos de crecimiento tienen un alto potencial (54% y 59%) para explicar el crecimiento de *P. hartwegii* y *Pinus pseudostrobus* ante variables climáticas.

Los parámetros obtenidos de las series de ambas especies revelan un confiable fechado con buena señal de crecimiento anual. La precipitación es la variable con más influencia en el desarrollo y crecimiento en las estaciones de invierno-primavera además se observó que la temperatura máxima se asocia negativamente lo que implica que al aumentar el crecimiento radial disminuye.

Pinus pseudostrobus al ser una de las especies con amplia distribución en el país se considera de gran importancia ante el cambio climático, dado que representa significativamente la correlación entre el crecimiento de sus anillos con las variables ambientales en gran parte del territorio nacional.

La temperatura mínima y máxima son consideradas altamente importantes para el crecimiento de las maderas temprana y tardía respectivamente. Sin embargo, la precipitación es la variable con mayor influencia en el desarrollo del anillo con un coeficiente de mayor correlación. Dicha información aporta conocimiento sobre la variabilidad histórica del clima de 201 años para la región, constituyendo al inicio de una red de cronologías más completa para el estado anticipando episodios climáticos extremos que permitan un buen manejo de los recursos naturales.

El ritmo de crecimiento en algunas ocasiones no depende de la especie únicamente, sino de condiciones del sitio y se favorecen aquellos individuos con un mayor

régimen de precipitaciones. La gestión forestal sostenible y otras proyecciones de conservación de estos bosques requieren del conocimiento con una dinámica de crecimiento y un buen rendimiento futuro en relación con los cambios ambientales.

Las evidencias donde se utiliza la dendrocronología mediante los nuevos modelos demuestran los beneficios ecológicos, económicos y sociales dejando claro que son un aporte fundamental que brinda beneficios a largo plazo para cumplir con los objetivos de desarrollo en las comunidades o zonas bajo manejo.

7. REFERENCIAS

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An updated review of dendrochronological investigations in Mexico, a megadiverse country with a high potential for tree-ring sciences. *Forests*, 8(5), 160. <https://doi.org/10.3390/f8050160>
- Aguirre, C.O.A. (1997). Hacia el manejo de ecosistemas forestales. *Madera y Bosques*, 3(2), 3–11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61730202>
- Aguirre-Calderón, O.A. (2015). Forest management in the XXI Century. *Madera y Bosques*, 21(especial), 17–28. <http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/423/563>
- Allen, S. T., Keim, R. F., Dean, T. J. (2019). Contrasting effects of flooding on tree growth and stand density determine aboveground production, in baldcypress forests. *Forest Ecology and Management*, 432, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.041>
- Álvarez, L.R. (2016). Determinación de turnos para las principales especies de coníferas en la región del Cofre de Perote, Veracruz, in: El Cofre de Perote-Situación, Perspectivas e Importancia. pp. 192–197.
- Amoroso, M. y Suarez, M. L. (2015). La aplicación del análisis de los anillos de crecimiento a interrogantes ecológicos: Un breve repaso de la Dendroecología en Hispanoamérica. *Ecosistemas*, 24(2), 1-6. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24->
- Aquino, J. A. R., Pérez, J. J., Calderón, O. A. A., Rodríguez, E. A., & Ortiz, G. R. (2025). Efecto del manejo forestal maderable sobre la estructura y diversidad

- del bosque de *Pinus L.* en Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(87), 100-126. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1492>
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y bosques*, 25(2).
- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R. y Soria-Díaz, L. (2016). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warning. *Trees*, 33, 1087–1100 <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., & Sánchez, R. (2001). Fisiología vegetal. Madrid, España: Ediciones Pirámide.
- Biondi, F., Hartsough, P. C. y Galindo-Estrada, I. (2005). Daily weather and tree growth at tropical treeline of North America. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 6–24. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0016:dwatqa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0016:dwatqa]2.0.co;2)
- Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary*. Academic Press Ltd. London, UK. 614 p.
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Von Storch, H., Luterbacher, J. (2005). Historical climatology in Europe - The state of the art. *Climate Change*, 70(3), 363–430. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5924-1>
- Brichta, J., Šimůnek, V., Bílek, L., Vacek, Z., Gallo, J., Drozdowski, S., ... & Fuchs, Z. (2024). Effects of climate change on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growth

- across europe: Decrease of tree-ring fluctuation and amplification of climate stress. *Forests*, 15(1), 91. <https://doi.org/10.3390/f15010091>
- Briffa, K.R. (2000). Annual climate variability in the Holocene: Interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), 87–105. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00056-6)
- Calmel, M., Martinet, A., Grondard, N., Dufour, T., Rageade, M. & Ferté-Devin, A. (2010). *REDD+ at project scale. Evaluation and development guide*. ONF International. 215 p.
- Castañeda, F. (2000). Criterios e indicadores de la ordenación forestal sostenible: procesos internacionales, situación actual y perspectivas. *Unasyva*, 203, 34-40. <http://www.fao.org/3/x8080s/x8080s06.htm/>(accessed 19 March 2021).
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Trucios-Caciano, R. y Guerra-de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41–54. <https://doi.org/10.14350/riq.35190>
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2012). Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2004-2009. Jalisco, México: Coordinación General de Planeación e Información-Gerencia de Inventario Forestal y Geomática de la Comisión Nacional Forestal. <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/infys/temas/resultados-2004-2009> (accessed 15 April 2021).
- Constante, G.V., Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Cornejo, O.E.H., y Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de

precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.

Contreras-Mata, L., Astudillo-Sánchez, C. C., Alanís-Rodríguez, E., Treviño-Carreón, J., Mora-Olivo, A., & Soria-Díaz, L. (2024). Dendrochronological potential of weeping pinyon (*Pinus pinceana* Gordon) in Tamaulipas, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 30(3).
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.01.001>

Del Valle, J.I., Ramirez, J.A., Herrera, D.A. (2012). Experiencias dendroclimáticas con árboles de ecosistemas contrastantes de Colombia. Cuadernos de Geografía. *Revista Colombiana de Geografía*, 21(2), 117–126.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v21n2.32217>

Díaz S., C., M. T. Therrell, D. W. Stahle & M. K. Cleaveland. (2002). Chihuahua winter – spring precipitation reconstructed from tree – rings. *Climate Research* 22: 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.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100111&lng=es&tlng=es

Espinosa, M. H., Márquez, R. J. Alejandro, R. J. y Cruz, J. H. (2009). Estudios de conos de *Pinus pseudostrobus* Lindl, En un relicto de la localidad el paso, municipio de la perla, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 11(1): 33-38.

Fritts, H. (1976). *Tree rings and climate*. London: Academic Press. 567 p.

- Fritts, H. C. (1991). Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: a diagnostic analysis. Tucson, Estados Unidos: The University of Arizona Press.
- Fritts, H.C. (1976). *Tree Rings and Climate*. New York, USA: Academic Press.
- García, Á., Velasco, V., Rodríguez, G. & Enríquez, J. (2017). Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schlttdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 1–23.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n44/2007-1132-remcf-8-44-00132.pdf>
- Gernandt, D. S. & Pérez-De La Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126–133.
<https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- González Juan, J. (2019). *Respuesta del crecimiento de Pinus pseudostrobus Lindl a las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey* (Tesis Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Grissino, M.H.D. (2001). FHX2 Software para analizar patrones temporales y espaciales en regímenes de incendios de anillos de árboles. *Investigación de anillos de árboles*, 57(1), 115-124.
- Gutiérrez, E., Trejo, I., Bucio, C., Luna, J., Miguel, A., Ramírez, M., & Vázquez, M. (2022). Estaciones meteorológicas y estudios dendroclimáticos en México: ¿Cuál estación elegir?. *Madera y bosques*, 28(2).
<https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822450>
- Gutiérrez, L.A.B. y Ramos, G.M.V. (2013). Anatomía de anillos de crecimiento de 80 especies arbóreas potenciales para estudios dendrocronológicos en la

selva central, Perú. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1025–1037.
<https://doi.org/10.15517/rbt.v61i3.11778>

Gutiérrez-García, G. y Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902676.
<http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>

Hernández, L. A., Martínez, R. M., Vargas, H. J., Velázquez-Martínez, A., Ángeles, G. (1996). Características de los anillos y densidad de la madera a diferentes alturas del fuste en rodales aclareados de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Ciencia Forestal en México*, 21(80), 39-55.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/987>

Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43(1), 69-75.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)

Ibarra, M. J., Huerta, M. F. (2016). Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 39-50. doi: 10.29298/rmcf.v7i37.50

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. (2013). Estaciones climáticas extraído de ERIC III (Extractor Rápido De Información Climática). Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1: 250,000, Serie IV, DGG-INEGI, México.

- IPCC. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed 08 April 2021).
- Kitzberger, T., Veblen, T. & Villalba, R. (2000). Métodos dendrocronológicos y sus aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. In F. Roig (Ed.), *Dendrocronología en América Latina* (pp. 17-78). Argentina: Ediunc.
- Korjus, H. (2014). Challenges in Forest Management Planning. *Forest Research Open Access*, 3, 3. <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9776.1000e110>
- Ligot, G., Fayolle, A., Gourlet-Fleury, S., Dainou, K., Gillet, J.-F., De Ridder, M., Doucet, T., Groenendijk, P., Doucet, J.-L. (2019). Growth determinants of timber species *Triplochiton scleroxylon* and implications for forest management in central Africa. *Forest Ecology and Management*, 437, 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.042>
- Lo, Y. H., Blanco, J. A., Seely, B., Welham, C. y Kimmins, J. P. (2010). Relationships between Climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 259, 932–942. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.033>
- López, L., Villalba, R., Bravo, F. (2013). Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. *Forest Ecology and Management*, 292, 49-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.011>
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., y Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables

climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas, México.
Revista de Biología Tropical, 66(4).

Losada, P. S., Amoroso, M. M., Bogino, S. M. (2018). Dinámica de la regeneración de *Austrocedrus chilensis* y *Nothofagus dombeyi* en bosques en decaimiento. *Bosque*, 39(2), 333-345. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000200333>

Lucas-Borja, M. E. & Vacchiano, G. (2018). Interactions between climate, growth and seed production in Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) forests in Cuenca Mountains (Spain). *New Forests*, 49(3), 399-414. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9626-8>

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., & Villanueva-Díaz, J. (2020). Sensibilidad climática en anchuras de anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii*: una especie alpina mexicana con potencial dendroclimático. *Revista mexicana de biodiversidad*, 91.

Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Villanueva-Díaz, J., Martínez-Sifuentes, A. R., & Delgado-Valerio, P. (2021). Anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* como indicadores de fluctuaciones climáticas y de la influencia de fenómenos océano-atmósfera en la Faja Volcánica Transmexicana. *Madera y bosques*, 27(3).

Marlès, M.J., Valor, T.I., López, B.C., Pérez, S.D.R., Maneja, Z.R., Sánchez, M.S. y Boada, M.J. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88(1), 19-32.

- Márquez, G. A. V. y Mendizábal, H. L. (2004). Variación en el tamaño de conos de *Pinus pseudostrobus* Lindl. Del Esquilón, municipio de Coacoatzintla, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 6(1): 33-36.
- Martinelli, N. (2004). Climate from dendrochronology: Latest developments and results. *Global Planet Change*, 40(1-2), 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00103-6)
- Montero, M. J. & J. L., Pérez. (2008). Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: P. Martínez, y A. Aguilar (eds). Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. pp: 11–21.
- Pérez-Suárez, M., Ramírez-Albores, J. E., Vargas-Hernández, J. J., & Alfaro-Ramírez, F. U. (2022). A review of the knowledge of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the need for improved future projections. *Trees*, 36(1), 25-37. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02221-9>
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V. H., Watson, J. E., VanDerWal, J., Fuller, R. A., Pressey, R. L., & Possingham, H. P. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature climate change*, 2(6), 448-452. <https://doi.org/10.1038/nclimate1453>
- Reyes-Basilio, I. B., Acosta-Hernández, A. C., González-Cásares, M., & Pompa-García, M. (2020). Perspectivas de los anillos de crecimiento para estimación potencial de carbono en México. *Madera y bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632112>

- Rodríguez S., L. (2007). Protocolo de Kyoto: debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 119-128.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1417>
- Roig, F. A., Villanueva D. J., Jiménez O. J., Hayden, J W. J., Barajas M. Luckman, B. H. (2012). Anatomía de maderas en comunidades rurales de Yucatán. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo., México. Libro Técnico Núm. 4. 242 p.
- Rojas-García, F., Gómez-Guerrero, A., García, G.G., Pérez, G.Á., Hernández, V.J.R., Jong, B.H.J. (2020). The use of dendroecology in forest management: A review. *Madera y Bosques*, 26(3), 1–19.
<https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632116>
- Rubio-Cuadrado, Á., Camarero, J. J., del Río, M., Sánchez-González, M., Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., Gil, L. & Montes, F. (2018). Long-term impacts of drought on growth and forest dynamics in a temperate beech-oak-birch forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 48-59.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.015>
- Schulz, A.N., Mech, A.M., Asaro, C., Coyle, D.R., Cram, M.M., Lucardi, R.D., & Gandhi, K.J.K. (2018). Assessment of abiotic and biotic factors associated with eastern white pine (*Pinus strobus* L.) dieback in the Southern Appalachian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 423, 59–69.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.021>
- Schweingruber, F. H. (1988). Tree-rings: Basics and application of dendrochronology. D. Reidel Publishing Co. Dordrecht. 276 p.

- Selem, L. V., Paredes, J. C., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Corral, J. A. R. (2015). Red Dendrocronológica del Pino de Altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en México. <https://doi.org/10.14350/rig.42003>
- Serre-Bachet, F. (1994). *Annual and summer mean temperature reconstructions from tree-rings in western and southern Europe since A.D. 1550 with special reference to the late Maunder Minimum*. In: Frenzel, B. (Ed.), *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675– 1715*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, pp. 265– 273.
- Speer, J.H. (2010). *Fundamentos de la investigación de anillos de árboles*. Arizona, Tucson: Universidad de Arizona Press.
- Srur, A., Villalba, R., Villagra, P.E., Hertel, D. (2008). Influencia de las variaciones climáticas y la concentración de CO₂ en el crecimiento y la eficiencia en el uso del agua de *Nothofagus pumilio* en un gradiente altitudinal en la Patagonia. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81(2), 239–256. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2008000200007>
- Stojanović, M., Sánchez-Salguero, R., Levanič, T., Szatniewska, J., Pokorný, R., Linares, J. C. (2017). Forecasting tree growth in coppiced and high forests in the Czech Republic. The legacy of management drives the coming *Quercus petraea* climate responses. *Forest Ecology and Management*, 405, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.021>
- Tang, X., Lu, Y., Fehrmann, L., Forrester, D. I., Guisasola-Rodríguez, R., Pérez-Cruzado, C., Kleinn, C. (2016). Estimación de la dinámica de la biomasa aérea a nivel del rodal mediante análisis de anillos de árboles en una

- plantación de abetos chinos en el condado de Shitai, provincia de Anhui, China. *Nuevos bosques*, 47(2), 319–332. doi 10.1007/s11056-015-9518-0
- Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangeat, I. & Araujo, M. B. (2011). Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470, 531-534. <https://doi.org/10.1038/nature09705>
- Torres-Rojo, J. M. (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina. Documento de Trabajo. Informe Nacional México.
- Urquijo, P. S., Lazos, A. E. y Lefebvre, K. (2022) *Historia ambiental de América Latina, Enfoques, procedimientos y cotidianidades*. (1ed) Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán, México
- Vanoni, M., Cailleret, M., Hülsmann, L., Bugmann, H., Bigler, C. (2019). How do tree mortality models from combined tree-ring and inventory data affect projections of forest succession?. *Forest Ecology and Management*, 433, 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.042>
- Villalba, R. (2000). Dendroclimatology: a southern hemisphere perspective. In P.P. Smolka., W. Volkheimer (Eds.), *Southern hemisphere paleo- and neoclimates*.
- Villalba, R., Villagra, P.E., Boninsegna, J.A., Moyano, Morales, M.S., Moyano, V., (2000). Dendroecología y Dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. *Multequina*, 9(2), 01–18.
- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K. Therrell, M.D. (2000). Estado actual de la dendrocronología en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 25(88), 5–36.

<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/921>

Villanueva, D.J., Rubio, C.E.A., Chávez, D.Á.A., Zavala, A.J.L., Cerano, P.J. y Martínez, S.A.R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y bosques*, 24(1), 1-14.

Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A. y Franco-Ramos, O. (2015). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 3, 175–185.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v39n2/0187-7380-rfm-39-02-00175.pdf>

Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), 201-213.

Zeller, L., Ammer, C., Annighöfer, P., Biber, P., Marshall, J., Schütze, G., Gaztelurrutia, M.R., Pretzsch, H. (2017). Tree ring wood density of Scots pine and European beech lower in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 400, 363-374.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.018>.