

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) FRANCO, EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

Tesis

Que presenta JUAN RAMÍREZ MÉNDEZ
Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Junio, 2025

INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) FRANCO, EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

Tesis

Elaborado por JUAN RAMÍREZ MÉNDEZ como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



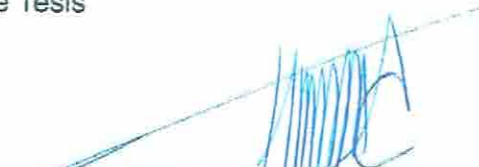
Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo

Director de Tesis



Dr. Jorge Méndez González

Asesor



Dr. Celestino Flores López

Asesor



Dr. Julián Cerano Paredes

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila

Junio, 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi *Alma Terra Mater*, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por ser el espacio donde germinó y floreció este proyecto de vida académica.

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por el invaluable apoyo económico a través de la beca otorgada, la cual hizo posible la realización de mis estudios de Maestría.

A los asesores del presente trabajo: **Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo, Dr. Julián Cerano Paredes, Dr. Jorge Méndez González y Dr. Celestino Flores López**, por haberme brindado la oportunidad de colaborar con ustedes. Agradezco profundamente su orientación, sus consejos y cada una de las sugerencias que enriquecieron este estudio.

Mi más sincero agradecimiento a los ejidatarios y habitantes de los ejidos y comunidades **“El Brillante”, “El Tarahumar y Bajíos del Tarahumar”, “San Juanito” y “La Norteña”**, donde se desarrolló este trabajo, por su hospitalidad, su colaboración durante el trabajo de campo y por permitirme el acceso a sus áreas forestales.

Y a la **Sierra Madre Occidental**, por enseñarme en silencio la sabiduría de los bosques, la resistencia de los árboles y la belleza de lo esencial.

El presente trabajo de tesis fue realizado con el apoyo del Proyecto de Investigación titulado *“Cambio climático y crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental, México”*, con clave **38111-425103001-2216**, aprobado por la Dirección de Investigación de la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**. El responsable del proyecto fue el **Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo**, Profesor-Investigador del **Departamento Forestal**.

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre,

María Méndez Domínguez[†],

cuya fuerza, amor y sabiduría guían mis pasos.

*Y a mi padre, **Manuel Ramírez Domínguez,***

por su apoyo constante y ejemplo de integridad.

*Y a **Judith Reyes Flores,** mi compañera de vida,*

por caminar a mi lado, por su amor, compañía y fe inquebrantable.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Cambio climático	3
Fundamentos de la dendrocronología	3
Formación de anillos de crecimiento	4
Bosques templados y <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	5
Déficit de presión de vapor.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Área de estudio	7
Desarrollo de cronologías.....	8
Datos climáticos	9
Análisis estadístico	11
RESULTADOS.....	12
Desarrollo de cronologías.....	12
Influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial.....	16
DISCUSIÓN	22
Desarrollo de cronologías.....	22
Influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial.....	23
CONCLUSIONES	26
REFERENCIAS	27
ANEXOS.....	38

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación y altitud de los puntos geográficos utilizados para la extracción de datos climáticos mensuales de reanálisis de ERA5-Land (PPT, Tmin, Tmax y Tdew) durante el periodo 1950-2023, en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental.	10
Cuadro 2. Características de las cronologías individuales (CAM, ALP, TAR y BRI) y la cronología regional de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental.	12
Cuadro 3. Estadísticas descriptivas de las cronologías individuales (CAM, ALP, TAR y BRI) y la cronología regional de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental.	13

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización geográfica del área de estudio en la Sierra Madre Occidental (A). Ubicación de los sitios de muestreo: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP), El Tarahumar (TAR) y El Brillante (BRI) (B), donde se colectaron núcleos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (C, D, E y F), y en color rojo los puntos de extracción de la información climática observada (B). 7
- Figura 2.** Análisis de Componentes Principales para las cronologías de ancho de anillo total de los cuatro sitios de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental (A). Contribución de cada cronología al primer componente (B)..... 14
- Figura 3.** Cronología regional de RWI de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (línea morada). La línea negra punteada representa la media, la roja un spline de 10 años y la verde el tamaño de muestra (número de series) (A). En el gráfico inferior, la línea naranja muestra la señal expresada de la población (EPS), la verde claro la correlación promedio entre series (Rbar), y el azul vertical discontinua intercepta RWI, EPS y Rbar en el año 1699, donde $EPS > 0.85$. La línea rosa horizontal indica $EPS = 0.85$, muestra que la cronología está estadísticamente sustentada por el tamaño de muestra (B). 15
- Figura 4.** Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y precipitación total mensual. En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado..... 16
- Figura 5.** Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las

variables climáticas: temperatura mínima (A) y temperatura máxima (B). En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado. 17

Figura 6. Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y déficit de presión de vapor. En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado..... 18

Figura 7. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y la precipitación total mensual. En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$)..... 19

Figura 8. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las variables climáticas: temperatura mínima mensual (A) y temperatura máxima mensual (B). En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones

a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$)..... 20

Figura 9. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y el déficit de presión de vapor. En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$)..... 21

Figura 10. Valores del déficit de presión de vapor (VPD) y la cronología regional (RWI) de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el periodo de 1950-2023, en la Sierra Madre Occidental. 25

RESUMEN

INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) FRANCO, EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

POR:

JUAN RAMÍREZ MÉNDEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Junio, 2025

El calentamiento global incrementa el Déficit de Presión de Vapor (VPD, por sus siglas en inglés), al elevar la temperatura del aire, afecta negativamente el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Los objetivos en este estudio fueron desarrollar una cronología regional de anillos de *P. menziesii* y evaluar la influencia del clima en su crecimiento radial. Las muestras se procesaron con métodos dendrocronológicas estándar. El fechado se validó con COFECHA y se generaron series de índice de anillo con el paquete dplR. Las variables climáticas se obtuvieron de ERA5-Land y la relación con el Índice de Ancho de Anillo Total (RWI, por sus siglas en inglés) se determinó con el paquete treeclim en R. Se generaron cuatro cronologías de *P. menziesii*. Un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), determinó una respuesta climática común y se integró una serie regional. Esta serie mostró relación positiva con la precipitación (PPT) de noviembre del año previo a mayo del año actual ($r = 0.76$; $p < 0.05$) y relaciones negativas con la temperatura mínima (Tmin) de marzo-junio del año actual ($r = -0.59$; $p < 0.05$). Asimismo, correlaciones negativas significativas ($p < 0.05$) con la temperatura máxima (Tmax) y el VPD de enero-junio ($r = -0.82$ y $r = -0.84$, respectivamente). La relación entre la Tmax y el VPD amplifican la sequía atmosférica, lo que impacta en la reducción del crecimiento de *P. menziesii*, lo cual se ha intensificado en las últimas décadas.

Palabras clave: Déficit de presión de vapor, dendrocronología, Chihuahua, Durango.

ABSTRACT

CLIMATIC INFLUENCE ON THE RADIAL GROWTH OF *Pseudotsuga menziesii*
(Mirb.) FRANCO, IN THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

BY:

JUAN RAMÍREZ MÉNDEZ

MASTER IN SCIENCE IN ENGINEERING OF PRODUCTION SYSTEMS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO– ADVISER

Saltillo, Coahuila

June, 2025

Global warming increases the Vapor Pressure Deficit (VPD) by raising air temperature, which negatively affects the radial growth of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. The objectives of this study were to develop a regional tree-ring chronology of *P. menziesii* and to evaluate the influence of climate on its radial growth. Samples were processed using standard dendrochronological methods. Cross-dating was validated with COFECHA, and ring-width index (RWI) series were generated using the dplR package. Climate variables were obtained from ERA5-Land, and their relationship with RWI was analyzed using the treeclim package in R. Four *P. menziesii* chronologies were developed. A Principal Component Analysis (PCA) identified a common climatic response, allowing the integration of a regional series. This series showed a positive relationship with precipitation (PPT) from November of the previous year to May of the current year ($r = 0.76$; $p < 0.05$), and negative relationships with minimum temperature (Tmin) from March to June of the current year ($r = -0.59$; $p < 0.05$). Likewise, significant negative correlations ($p < 0.05$) were found with maximum temperature (Tmax) and VPD from January to June ($r = -0.82$ and $r = -0.84$, respectively). The relationship between Tmax and VPD amplifies atmospheric drought, which reduces the growth of *P. menziesii*, a trend that has intensified in recent decades.

Keywords: Vapor pressure deficit, dendrochronology, Chihuahua, Durango.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático afecta significativamente a los ecosistemas forestales, principalmente por el aumento de la temperatura global, proyectado entre 1.4 y 4.4 °C hacia finales del siglo (IPCC, 2023). Este incremento térmico impacta la dinámica y estructura de la vegetación, al generar una reducción en el crecimiento arbóreo, mayor estrés hídrico y aumento en la mortalidad (Hammond *et al.*, 2022; Novick *et al.*, 2024).

En zonas templadas de México, los bosques de coníferas dependen en gran medida de la disponibilidad de agua, especialmente de la precipitación invernal que, en forma de nieve, se libera gradualmente como humedad durante la primavera, periodo en que los árboles reanudan su crecimiento (Villanueva-Díaz *et al.*, 2020; Cerano-Paredes *et al.*, 2023). Dentro de este ecosistema, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco representa un elemento relictivo de los bosques montañosos, la cual se encuentra restringida a barrancas con alta disponibilidad de humedad (González-Elizondo *et al.*, 2017). Esta especie es clave en estudios dendrocronológicos, ya que sus anillos de crecimiento anual registran y permiten identificar cambios ambientales y climáticos a lo largo del tiempo (Fritts, 1976).

El Déficit de Presión de Vapor (VPD, por sus siglas en inglés) definido como la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real del aire, indica el grado de sequedad atmosférica y la presión evaporativa sobre las plantas (Grossiord *et al.*, 2020). Con el cambio climático, el VPD tiende a incrementar como resultado de cambios en la temperatura del aire (Breshears *et al.*, 2013). Este incremento provoca el cierre estomático como mecanismo de defensa para reducir la pérdida de agua por transpiración (Jalakas *et al.*, 2021).

Diversos estudios han señalado un notable aumento en el VPD a nivel global en las últimas décadas (Barkhordarian *et al.*, 2019; Grossiord *et al.*, 2020; Broz *et al.*, 2021). Además, varios estudios recientes con anillos de árboles identifican el aumento del VPD junto a la temperatura como una limitación importante para el

crecimiento de los árboles (Babst *et al.*, 2019; Zuidema *et al.*, 2022; Groenendijk *et al.*, 2025).

En México, en los últimos 20 años destaca la dominancia de estudios centrados en la relación entre el ancho de los anillos de crecimiento y las variables climáticas (Morales-Estrada *et al.*, 2025). Sin embargo, pocos han incorporado el VPD en sus análisis de respuesta del crecimiento. Entre ellos destacan los trabajos de Correa-Díaz *et al.* (2020) y Pompa-García *et al.* (2022). Más recientemente, Cerano-Paredes *et al.* (2024) realizaron el primer análisis específico sobre la influencia del VPD en el crecimiento de *P. menziesii*.

Dada la sensibilidad fisiológica de *P. menziesii* a los cambios ambientales, es fundamental comprender cómo las variaciones en la disponibilidad hídrica y el VPD influyen en su crecimiento radial. Este estudio contribuye al conocimiento sobre la respuesta de los bosques de *P. menziesii* en la Sierra Madre Occidental (SMOc) frente al aumento de temperatura y el VPD. En este estudio los objetivos son: (1) desarrollar una cronología regional de anillos de crecimiento de *P. menziesii* y (2) evaluar la influencia de variables climáticas como la precipitación, las temperaturas mínima y máxima y el VPD en el crecimiento radial de *P. menziesii*.

REVISIÓN DE LITERATURA

Cambio climático

El cambio climático ha alterado de manera significativa los patrones climáticos, particularmente en la temperatura y la distribución de las precipitaciones. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), las proyecciones de los escenarios climáticos futuros indican modificaciones en la intensidad y el patrón del ciclo hidrológico, incluida una posible disminución en la precipitación promedio. Asimismo, se prevé un aumento en la temperatura global que podría oscilar entre 1.0 y 3.7 °C (IPCC, 2023).

Para México, entre 1971 y 2020, la temperatura media aumentó a una tasa de 0.31 °C por década (World Bank Group [WBG], 2023). Este aumento térmico tendrá implicaciones directas sobre la dinámica y productividad de los ecosistemas forestales (Yuan *et al.*, 2019), principalmente por la intensificación y frecuencia de las condiciones de sequía (Hammond *et al.*, 2022). Estas condiciones reducen la disponibilidad de agua en el suelo y aumentan la demanda evaporativa, lo que genera un impacto directo en los procesos fisiológicos y en el crecimiento de las especies forestales (Restaino *et al.*, 2016; Grossiord *et al.*, 2020).

Fundamentos de la dendrocronología

La dendrocronología es una disciplina científica dedicada al análisis y la reconstrucción de los cambios pasados que han influido en el crecimiento de los árboles (Biondi, 2020). El término dendrocronología deriva de tres palabras griegas: *dendron* (árbol), *chronos* (tiempo) y *logos* (estudio) (Biondi, 2020). Esta ciencia facilita el análisis de diversos factores que afectan el crecimiento de los árboles, tanto de origen fisiológico como ambiental (Speer, 2010). El estudio de los anillos de crecimiento ha sido aplicado en múltiples disciplinas, entre ellas la reconstrucción climática (Fritts, 1976), el análisis de la dinámica de los bosques (Biondi, 2020), la datación de estructuras arqueológicas y la investigación de los procesos de formación de la madera (Speer, 2010).

El fechado de los anillos de crecimiento es uno de los fundamentos de la dendrocronología, ya que permite asignar el año calendario exacto a cada capa de madera formada (Stokes & Smiley, 1996). Este proceso se realiza mediante el fechado cruzado o crossdating, una técnica que compara de forma visual y estadística los patrones de anillos entre diferentes muestras, con el objetivo de detectar anillos faltantes, falsos o que no estén bien definidos (Holmes, 1983; Stokes & Smiley, 1996).

Los anillos de los árboles son uno de los archivos más versátiles de la naturaleza, ya que proporcionan información sobre las condiciones ambientales pasadas con una resolución anual e intraanual y desde escalas locales hasta globales (Fritts, 1976; Speer, 2010). Constituyen herramientas fundamentales para estudiar el impacto del cambio ambiental en el crecimiento y la fisiología de los árboles y ecosistemas forestales, así como para evaluar y reconstruir las condiciones ambientales del pasado (Siegwolf *et al.*, 2022).

En el estudio de los anillos de crecimiento de los árboles, es esencial relacionar los patrones de crecimiento con el desarrollo del árbol a lo largo de su vida y con las características evolutivas propias de cada especie, así como con los cambios que ocurren en el ambiente (Fritts, 1976; Vaganov *et al.*, 2006).

Formación de anillos de crecimiento

En las coníferas, el xilema está compuesto por células especializadas llamadas traqueidas, caracterizadas por sus paredes celulares (Rathgeber, 2017). El crecimiento radial de estos árboles ocurre mediante la división celular en el cambium vascular (Plomion *et al.*, 2001). Durante el invierno, esta capa meristemática entra en un estado de inactividad o dormancia, suspende la producción celular, hasta que las condiciones ambientales más cálidas y húmedas de la primavera estimulan nuevamente su actividad (Fritts, 1976). Con el reinicio de la actividad del cambium vascular, se inicia la producción de madera temprana, seguida posteriormente por la formación de madera tardía (Speer, 2010).

Bosques templados y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Los bosques templados de la Sierra Madre Occidental (SMOc) no solo representan una importante fuente de desarrollo económico regional, sino que también ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica, la captura de carbono, la conservación del suelo, la biodiversidad, y el valor paisajístico y recreativo (González-Elizondo *et al.*, 2017).

En este contexto, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco destaca como una conífera relictica cuya presencia en México es extremadamente limitada (Rzedowski, 2006). Se localiza principalmente en zonas montañosas del centro y norte del país, en altitudes entre los 2200 y 3300 m s.n.m., donde encuentra microambientes húmedos, frescos y protegidos de la insolación directa, como cañadas y laderas con exposición norte (Rzedowski, 2006; González-Elizondo *et al.*, 2017). En estas áreas, forma parte de rodales mixtos junto a especies de *Abies*, *Picea*, *Cupressus*, *Pinus*, *Juniperus*, *Populus* y *Quercus* (García-Arévalo, 2008; Gernandt & Pérez-de la Rosa, 2014; González-Elizondo *et al.*, 2017; Noriega-Villa *et al.*, 2023).

Aunque en Norteamérica esta especie es ampliamente distribuida desde Canadá hasta el norte de México (Hermann & Lavender, 2014), las poblaciones mexicanas son de importancia biogeográfica (Rzedowski, 2006; González-Elizondo *et al.*, 2017). Debido a su deterioro, en México se encuentra bajo la categoría de protección especial (Pr) según la NOM-059-SEMARNAT-2010, lo que prohíbe su aprovechamiento (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010). A pesar de ello, *P. menziesii* se reconoce como una de las coníferas más importantes del mundo por su valor económico, amplia distribución y presencia en plantaciones forestales internacionales (Hermann & Lavender, 2014).

Déficit de presión de vapor

El Déficit de Presión de Vapor (VPD, por sus siglas en inglés) representa la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire, correspondiente a una humedad relativa del 100%, y la presión de vapor real, determinada por la

humedad relativa del ambiente (Allen *et al.*, 2006). Esta variable expresa el grado de sequedad atmosférica y la fuerza evaporativa que actúa sobre las plantas, y está fuertemente influenciada por la temperatura del aire (Bréda *et al.*, 2006; Breshears *et al.*, 2013; Allen *et al.*, 2015; Grossiord *et al.*, 2020). Se expresa en kilopascales (kPa) y tiene implicaciones fisiológicas relevantes, especialmente en la regulación estomática y la eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas (Day, 2000).

Desde una perspectiva funcional, el VPD regula la apertura y cierre de los estomas, estructuras especializadas en la epidermis foliar responsables del intercambio gaseoso y la transpiración (Jalakas *et al.*, 2021). Cuando el VPD se encuentra dentro de un rango moderado (aproximadamente entre 0.5 y 1.5 kPa), se favorece el funcionamiento fisiológico óptimo de las plantas (Leverenz, 1981). Sin embargo, valores superiores a 2.0 kPa inducen el cierre estomático como respuesta adaptativa para minimizar la pérdida de agua, lo que a su vez puede limitar la fotosíntesis y el crecimiento vegetal (Fletcher *et al.*, 2007; Restaino *et al.*, 2016; Grossiord *et al.*, 2020). Por el contrario, valores de VPD demasiado bajos (menores a 0.5 kPa) pueden crear un ambiente excesivamente húmedo, propicio para el desarrollo de patógenos y plagas (Seidl *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2023).

Con el cambio climático (IPCC, 2023), se prevé un aumento sostenido del VPD debido al incremento de las temperaturas y la disminución relativa de la humedad atmosférica (Breshears *et al.*, 2013; Seager *et al.*, 2015; Barkhordarian *et al.*, 2019). Este aumento incrementa la demanda evaporativa del aire y genera mayores tensiones hídricas en las plantas (Zhuang *et al.*, 2014). A nivel fisiológico, el aumento del VPD compromete la capacidad de los árboles para regular su balance hídrico, afecta su productividad y limita su resistencia ante eventos prolongados de sequía (McAdam & Brodribb, 2015; Jalakas *et al.*, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en cuatro sitios dentro de la Sierra Madre Occidental (Figura 1A). Campo Verde (CAM) localizado en el Ejido El Largo y Anexos, Madera, Chih.; Arroyo Laja Prieta (ALP) ubicado en el Ejido El Ranchito, Bocoyna, Chih.; El Tarahumar (TAR) que pertenece a la Comunidad El Tarahumar y Bajíos del Tarahumar, Tepehuanes, Dgo.; y El Brillante (BRI), que se sitúa en el Ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Dgo. (Figura 1B).

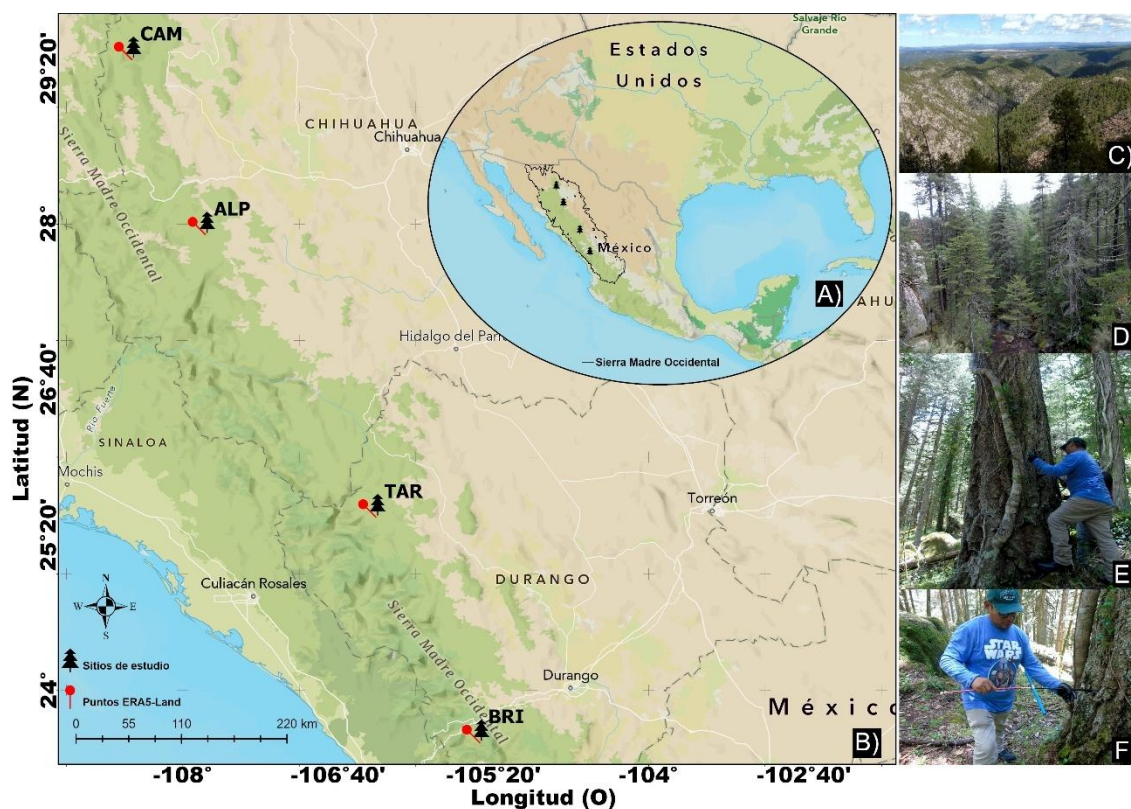


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en la Sierra Madre Occidental (A). Ubicación de los sitios de muestreo: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP), El Tarahumar (TAR) y El Brillante (BRI) (B), donde se colectaron núcleos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (C, D, E y F), y en color rojo los puntos de extracción de la información climática observada (B).

Los sitios de estudio presentan un sustrato geológico compuesto por rocas ígneas extrusivas de composición ácida (Álvarez, 1961). Registran tres grupos de suelos, umbrisols, regosols y leptosols (IUSS Working Group [WRB], 2022). Pertenecen a un clima templado húmedo, con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C, y precipitación anual de 800 a 1200 mm (García, 2004). La vegetación corresponde a un bosque mixto de pino-encino (Rzedowski, 2006).

Desarrollo de cronologías

Las muestras se colectaron en julio, agosto y octubre del 2024 de manera selectiva. Se tomaron árboles dominantes con características fenotípicas específicas como: apariencia longeva, tallo en espiral y ramas colgantes. Además de seleccionar árboles que crecían en condiciones ambientales particulares, suelos poco profundos, pendientes pronunciadas y baja perturbación del rodal (Cerano-Paredes *et al.*, 2022). Se extrajeron de dos a tres muestras de un total de 20 árboles por sitio (Speer, 2010), lo anterior al emplear taladros de Pressler Haglöf Sweden de 5.15 mm de diámetro interno y dimensiones variables (Anexo 1, Figura 1C, D, E y F).

Las muestras se prepararon de acuerdo con procedimientos dendrocronológicos estándar y para determinar el año exacto de la formación de los anillos, se empleó la técnica de fechado cruzado (Stokes & Smiley, 1996). Los anillos fueron analizados mediante un microscopio estereoscópico con aumentos de 10x a 40x. Cada muestra fue fechada al comparar varios anillos, lo que permitió identificar patrones de crecimiento (Speer, 2010). El ancho de los anillos se midió con un sistema de medición Velmex (Robinson & Evans, 1980) con una precisión de 0.001 mm, conectado a un software especializado MeasureJ2X (VoorTech, 2021) que registró la información del crecimiento de madera temprana, tardía y el ancho total del anillo. Una vez realizada la medición, el fechado se validó estadísticamente con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

En este estudio se trabajó con el ancho de anillo total. Las series individuales de ancho de anillo fueron estandarizadas para eliminar el ruido no relacionado con

el clima, como la tendencia por edad, la competencia y las perturbaciones del rodal. Para ello, se aplicó la técnica de ajuste de curva exponencial negativa, que sigue el modelo de crecimiento arbóreo (Fritts, 1976).

Se obtuvieron índices adimensionales que reflejan la influencia ambiental y climática (Fritts, 1976). A partir de las series estandarizadas se desarrollaron cronologías promedio de Índice de Ancho de Anillo Total (RWI, por sus siglas en inglés) al utilizar una media robusta biweight de Tukey, que minimiza los efectos de valores atípicos (Bunn *et al.*, 2008). Para cada sitio se obtuvieron dos tipos de cronologías: estándar y residual. En este estudio, se utilizó la cronología estándar, que es una estimación robusta de la media aritmética (Bunn *et al.*, 2025).

El proceso de estandarización y generación de las cronologías se llevaron a cabo a través del paquete *dplR* (Bunn *et al.*, 2025) en R (R Core Team, 2024); asimismo, en este paquete se utilizó para calcular las estadísticas descriptivas como la Intercorrelación entre Series (IS), la Señal de Población Expresada (EPS, por sus siglas en inglés), la Sensibilidad Media (MS, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación medio (R_{bar}) (Speer, 2010; Cook & Peterson, 2011).

Datos climáticos

La información climática para cada sitio, a partir de sus coordenadas geográficas (Cuadro 1) se obtuvo del conjunto de datos mensuales de reanálisis ERA5-Land, desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) (Muñoz, 2019). Este conjunto proporciona estimaciones mensuales de variables climáticas con alta resolución espacial y coherencia temporal, lo que lo hace particularmente útil para diferentes estudios.

Cuadro 1. Ubicación y altitud de los puntos geográficos utilizados para la extracción de datos climáticos mensuales de reanálisis de ERA5-Land (PPT, Tmin, Tmax y Tdew) durante el periodo 1950-2023, en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental.

Sitio	Latitud (°N)	Longitud (°O)	Altitud (m s.n.m.)	Variables descargadas
CAM	29.515	-108.423	2530	PPT, Tmin, Tmax, Tdew
ALP	28.014	-107.791	2390	PPT, Tmin, Tmax, Tdew
TAR	25.593	-106.327	2715	PPT, Tmin, Tmax, Tdew
BRI	23.660	-105.437	2730	PPT, Tmin, Tmax, Tdew

Nota: PPT = suma de precipitación (mm), Tmin = temperatura mínima a 2 metros (°C), Tmax = temperatura máxima a 2 metros (°C), Tdew = temperatura de punto de rocío a 2 metros (°C).

Se descargaron datos de precipitación (PPT), temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) y del punto de rocío a través de la plataforma Google Earth Engine (Anexo 11), correspondientes al periodo 1950–2023 (73 años). A partir de estas series climáticas (Cuadro 1), se estimó el VPD para cada sitio al utilizar la Ecuación 1, conforme a la metodología propuesta por Allen *et al.* (2006).

$$VPD = \left[\frac{bo * e^{\left(\frac{b1 * Tmax}{b2 + Tmax}\right)} + bo * e^{\left(\frac{b1 * Tmin}{b2 + Tmin}\right)}}{2} \right] - bo * e^{\left(\frac{b1 * Tdew}{b2 + Tdew}\right)} \quad (1)$$

Donde, bo = 0.6108, b1 = 17.27, b2 = 237.3, VPD = déficit de presión de vapor (kPa), Tmax = temperatura máxima (°C), Tmin = temperatura mínima (°C), Tdew = temperatura de punto de rocío (°C).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de correlación lineal para evaluar la asociación entre los diferentes índices de ancho de anillo total de *P. menziesii*. Después, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) con el objetivo de identificar patrones comunes, reducir la dimensionalidad de los datos y determinar la agrupación general de las series temporales de los sitios de estudio. El análisis abarcó el periodo común 1781-2023 (242 años) y se empleó el paquete FactoMineR en R (Lê *et al.*, 2008).

Se determinó la relación entre el RWI de *P. menziesii* y las variables climáticas (PPT, Tmin, Tmax y VPD) mediante correlación lineal de Pearson y función de correlación con ventana móvil. Para ello, se utilizó el paquete treeclim en R (Zang & Biondi, 2015; R Core Team, 2024). El análisis comprendió 73 años (1950-2023), se consideró 17 meses (junio-diciembre del año previo y de enero-octubre del año actual) para detectar efectos rezagados. La ventana móvil fue de 30 años con un nivel de significancia de $p < 0.05$ y remuestreo Bootstrap (1000 repeticiones) para reforzar la robustez del análisis (Zang & Biondi, 2015).

La correlación con ventana móvil permitió evaluar la estabilidad temporal de la relación entre las variables climáticas y el crecimiento radial, al identificar posibles cambios en la fuerza y la dirección de la correlación a lo largo del periodo estudiado (1950-2023) (Zang & Biondi, 2015).

RESULTADOS

Desarrollo de cronologías

Se logró fechar al año exacto de su formación el 92% (159) del total de núcleos de crecimiento (179) correspondientes a 79 árboles (Cuadro 2) de *P. menziesii*, el resto de las muestras (8%) no se lograron fechar por presentar problemas de crecimiento y madera en avanzado proceso de pudrición.

Cuadro 2. Características de las cronologías individuales (CAM, ALP, TAR y BRI) y la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental.

Sitio	Latitud (°N)	Longitud (°O)	Altitud (m s. n. m.)	Número de series	Periodo	Años
CAM	29.515	-108.423	2530	33	1655-2023	368
ALP	28.014	-107.791	2390	43	1776-2023	247
TAR	25.593	-106.327	2715	42	1770-2023	253
BRI	23.660	-105.437	2730	41	1781-2023	242
Cronología regional	---	---	---	159	1655-2023	368

Se determinó una correlación estadísticamente significativa ($p < 0.01$) entre las series, con coeficientes que oscilan entre 0.61 (mínimo) y 0.74 (máximo) (Cuadro 3). La longitud de las cronologías de RWI osciló entre 242 años, en el caso de la serie más corta, y 368 años, en la más extensa (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estadísticas descriptivas de las cronologías individuales (CAM, ALP, TAR y BRI) y la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental.

Sitio	Número de series	Periodo (Años)	IS	MS	Rbar	EPS ≥ 0.85
CAM	33	368	0.66	0.27	0.21	1659-2023
ALP	43	247	0.69	0.27	0.36	1849-2023
TAR	42	253	0.74	0.35	0.41	1799-2023
BRI	41	242	0.61	0.25	0.41	1824-2023
Cronología regional	159	368	0.58	0.29	0.24	1699-2023

Nota: IS = intercorrelación entre series, MS = sensibilidad media, Rbar = correlación móvil entre series, EPS = señal de población expresada.

El PCA determinó que el primer componente (PC1) agrupó las cuatro cronologías y explica el 63.4% de la varianza total (Figura 2A, B). Por lo que se integró una cronología regional de RWI de *P. menziesii*. La cronología comprende el periodo de 1655-2023 (368 años), con un tamaño de muestra de 159 series (Cuadro 3, Figura 3A).

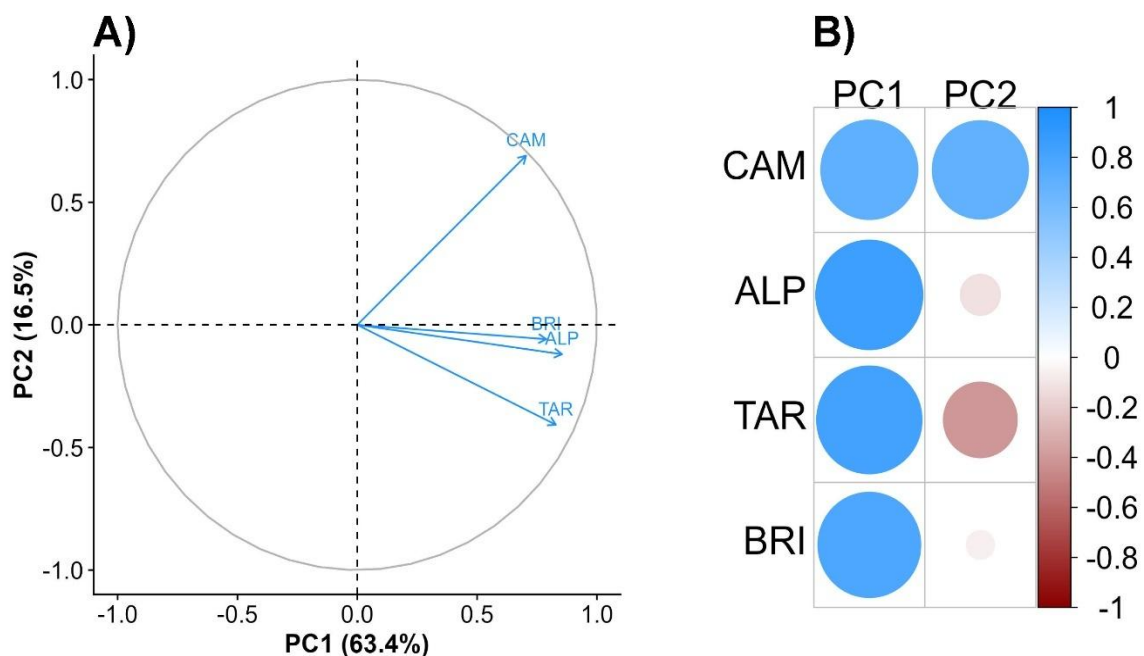


Figura 2. Análisis de Componentes Principales para las cronologías de ancho de anillo total de los cuatro sitios de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental (A). Contribución de cada cronología al primer componente (B).

La intercorrelación entre series obtenida es estadísticamente significativa ($r = 0.58$, $p < 0.0007$). La serie regional registra valores de señal de población expresada superior a 0.85 para el período de 1699-2023 (Cuadro 3). Se determinó un periodo de 324 años estadísticamente bien sustentado por tamaño de muestra (Figura 3B).

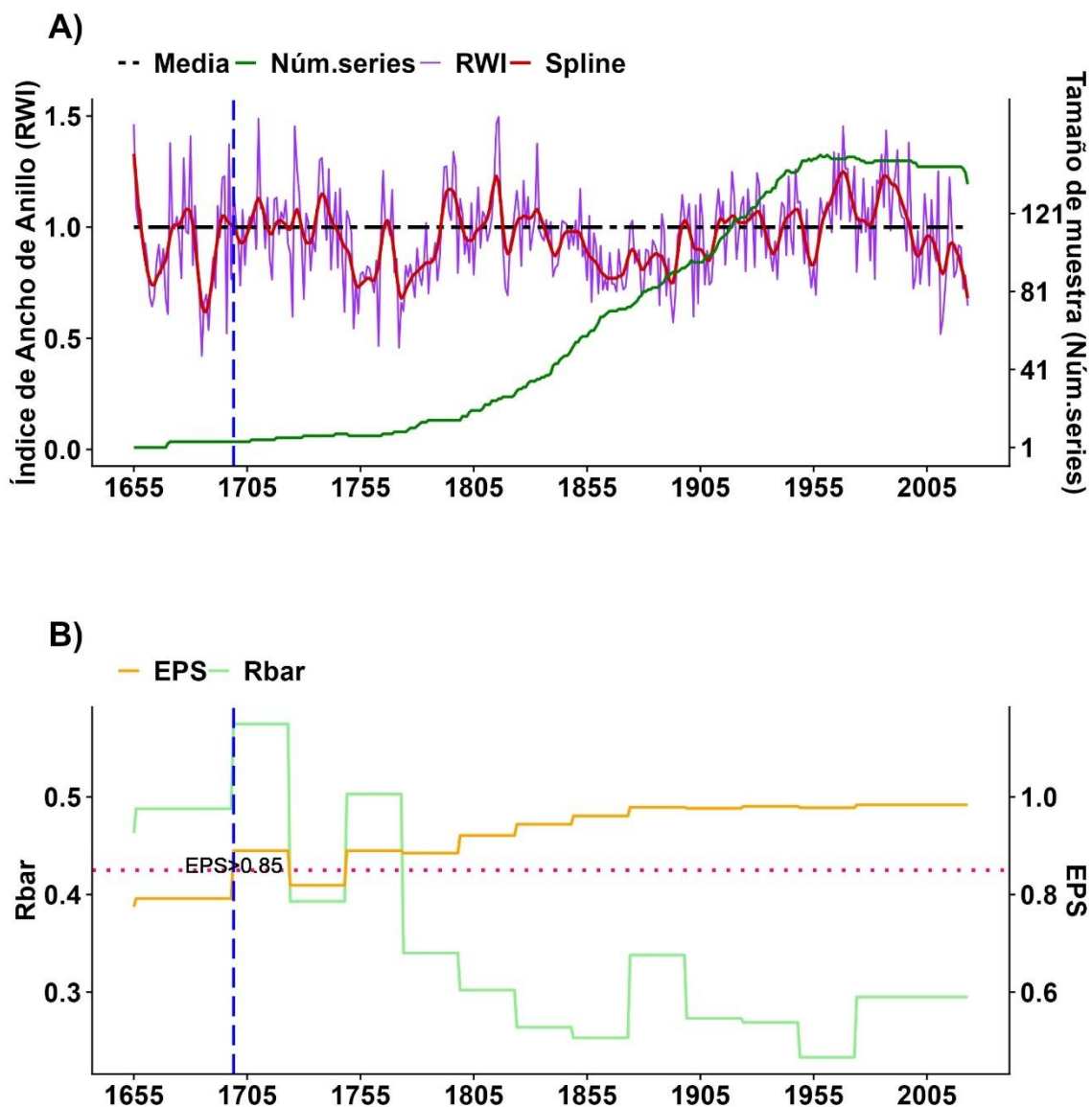


Figura 3. Cronología regional de RWI de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (línea morada). La línea negra punteada representa la media, la roja un spline de 10 años y la verde el tamaño de muestra (número de series) (A). En el gráfico inferior, la línea naranja muestra la señal expresada de la población (EPS), la verde claro la correlación promedio entre series (Rbar), y el azul vertical discontinua intercepta RWI, EPS y Rbar en el año 1699, donde $EPS > 0.85$. La línea rosa horizontal indica $EPS = 0.85$, muestra que la cronología está estadísticamente sustentada por el tamaño de muestra (B).

Influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial

El análisis de correlación entre el RWI y la PPT indicó una relación positiva y significativa ($p < 0.05$) con los meses de noviembre del año previo a mayo del año actual (Anexo 7, Figura 4); el mes de diciembre presentó la mejor correlación ($r = 0.54$; $p < 0.05$). Para la lluvia acumulada se determinó que el período que comprende los meses de noviembre-mayo registra la mejor correlación positiva significativa ($r = 0.76$; $p < 0.05$) (Anexo 7, Figura 4).

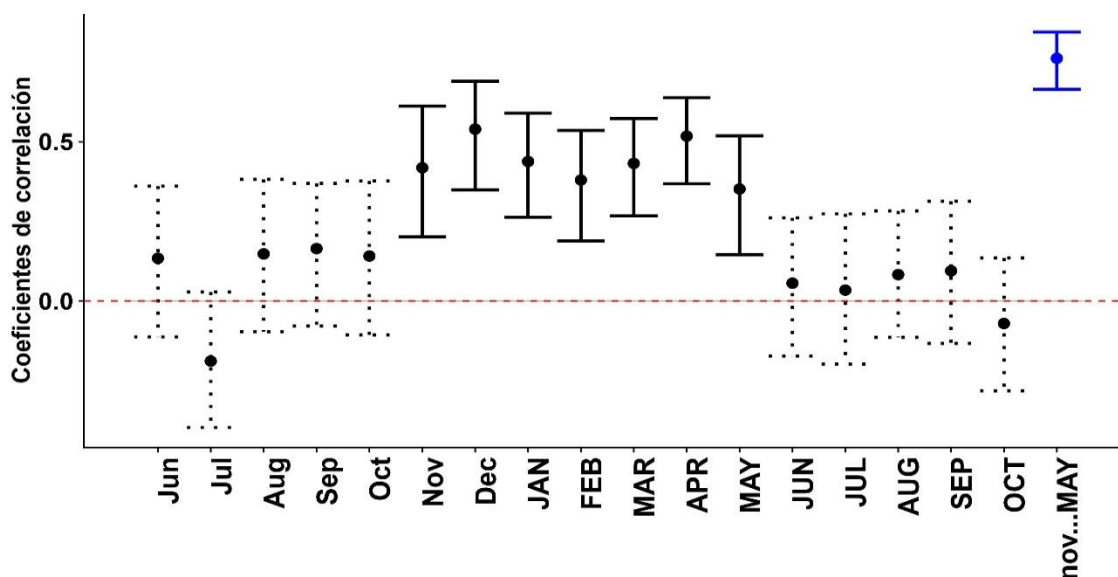


Figura 4. Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y precipitación total mensual. En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado.

Se determinó una correlación negativa entre la Tmin y el RWI (Anexo 8, Figura 5A). Los meses del año previo (junio, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre) presentaron correlaciones significativas (Anexo 8, $p < 0.05$); para los meses del año actual, enero, marzo, abril y junio, registraron correlaciones significativas (Anexo 8, $p < 0.05$). El mes de junio del año actual presentó la mejor

relación negativa significativa (Anexo 8, $r = -0.55$; $p < 0.05$). La Tmin acumulada de los meses de marzo-junio del año actual mostró una correlación negativa significativa ($r = -0.59$; $p < 0.05$) (Anexo 8, Figura 5A).

La correlación entre el RWI de *P. menziesii* y la Tmax mostró valores negativos significativos ($p < 0.05$) desde junio del año previo a junio del año actual (Anexo 9, Figura 5B). El mes de abril del año actual presentó la más alta correlación negativa significativa (Anexo 9, $r = -0.62$; $p < 0.05$). La correlación más alta para la Tmax acumulada (Figura 5B), se determinó para el periodo de enero-junio del año actual (Anexo 9, $r = -0.82$; $p < 0.05$).

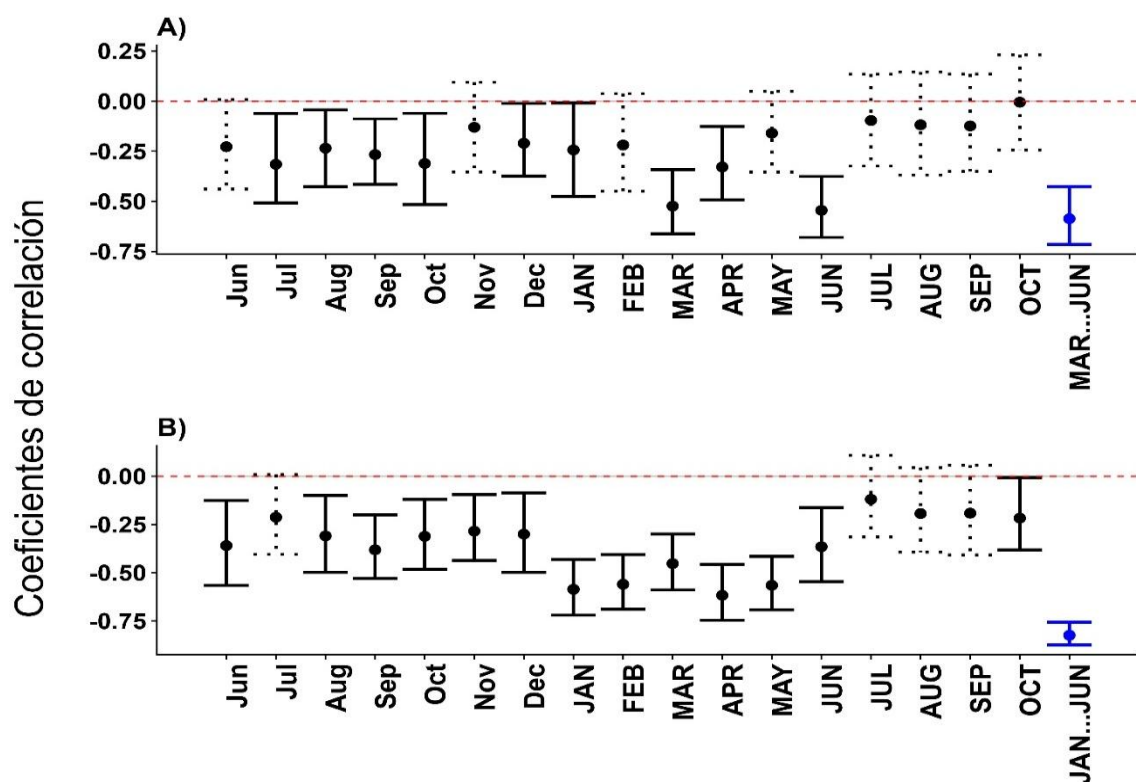


Figura 5. Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las variables climáticas: temperatura mínima (A) y temperatura máxima (B). En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado.

Al igual que las variables de temperatura, el VPD mostró una influencia negativa sobre el RWI (Anexo 10, Figura 6). El análisis de correlación reveló asociaciones negativas significativas ($p < 0.05$) para los meses junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre del año previo, y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y septiembre del año actual. La mejor correlación se observó para el mes de abril del año actual (Anexo 10, $r = -0.72$; $p < 0.05$). La correlación más alta para el VPD acumulado (Figura 6) se observó para el periodo de enero-junio del año actual (Anexo 10, $r = -0.84$; $p < 0.05$).

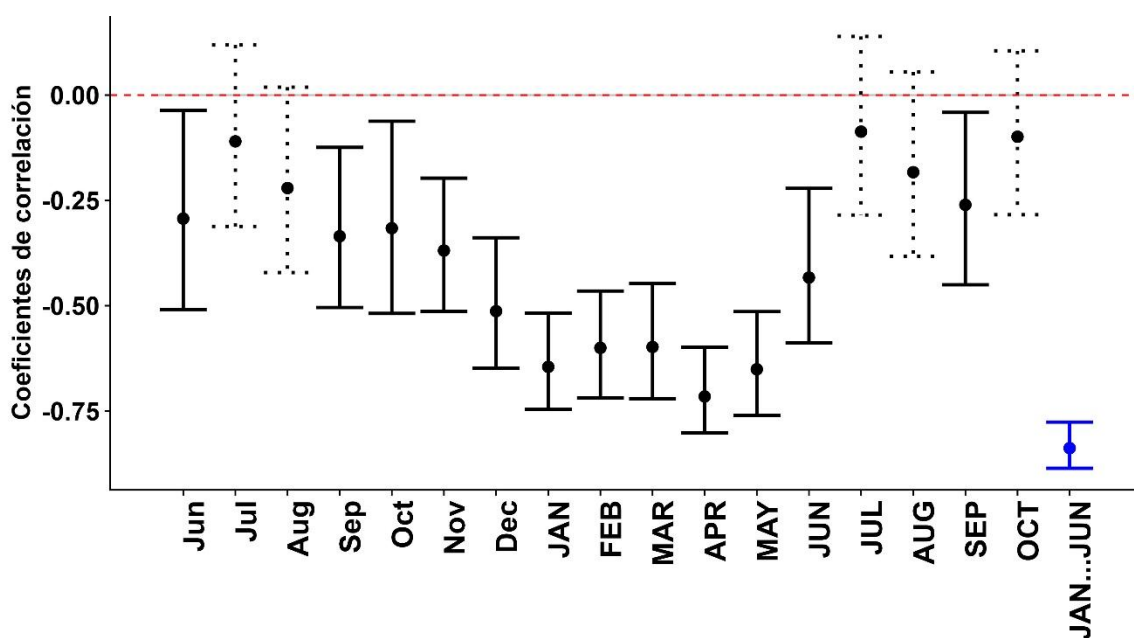


Figura 6. Coeficientes de correlación lineal con Bootstrap entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y déficit de presión de vapor. En el eje X, los meses en minúsculas corresponden al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza (95%). Se considera una correlación significativa cuando el intervalo no incluye cero ($p < 0.05$). La línea azul continua representa el periodo acumulado.

El análisis de correlación con ventana móvil entre el RWI y las variables climáticas para el periodo de 1950-2023, mostró correlaciones positivas, estables y significativas ($p < 0.05$) de noviembre del año anterior a mayo del año actual con la PPT (Figura 7), mientras que con la Tmin (Figura 8A) se presentaron

correlaciones negativas variables en el tiempo, en marzo y junio del año actual mostraron estabilidad, en abril y mayo del año actual se volvieron significativos ($p < 0.05$) a partir de 1970 y 1980, respectivamente.

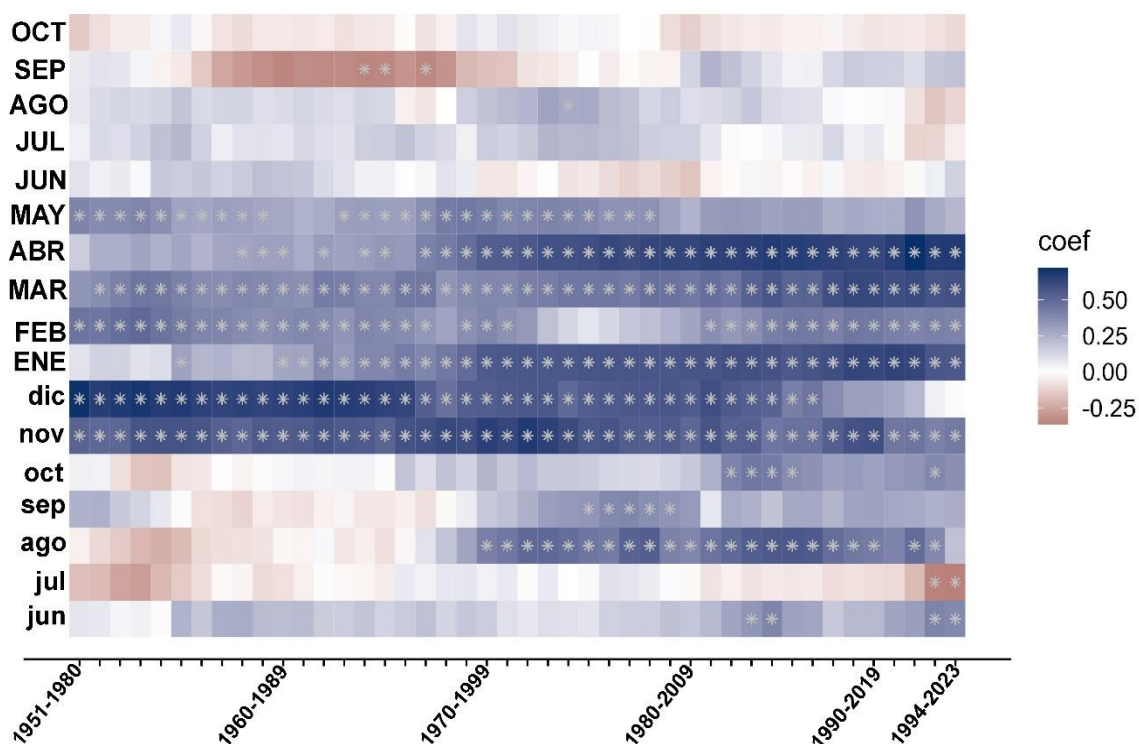


Figura 7. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y la precipitación total mensual. En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$).

Asimismo, para la Tmax se presentaron correlaciones negativas estables de enero-junio (Figura 8B), con dos periodos destacados: 1950-1969 ($r = -0.75$; $p < 0.05$) y 1970-2023 ($r = -0.83$; $p < 0.05$).

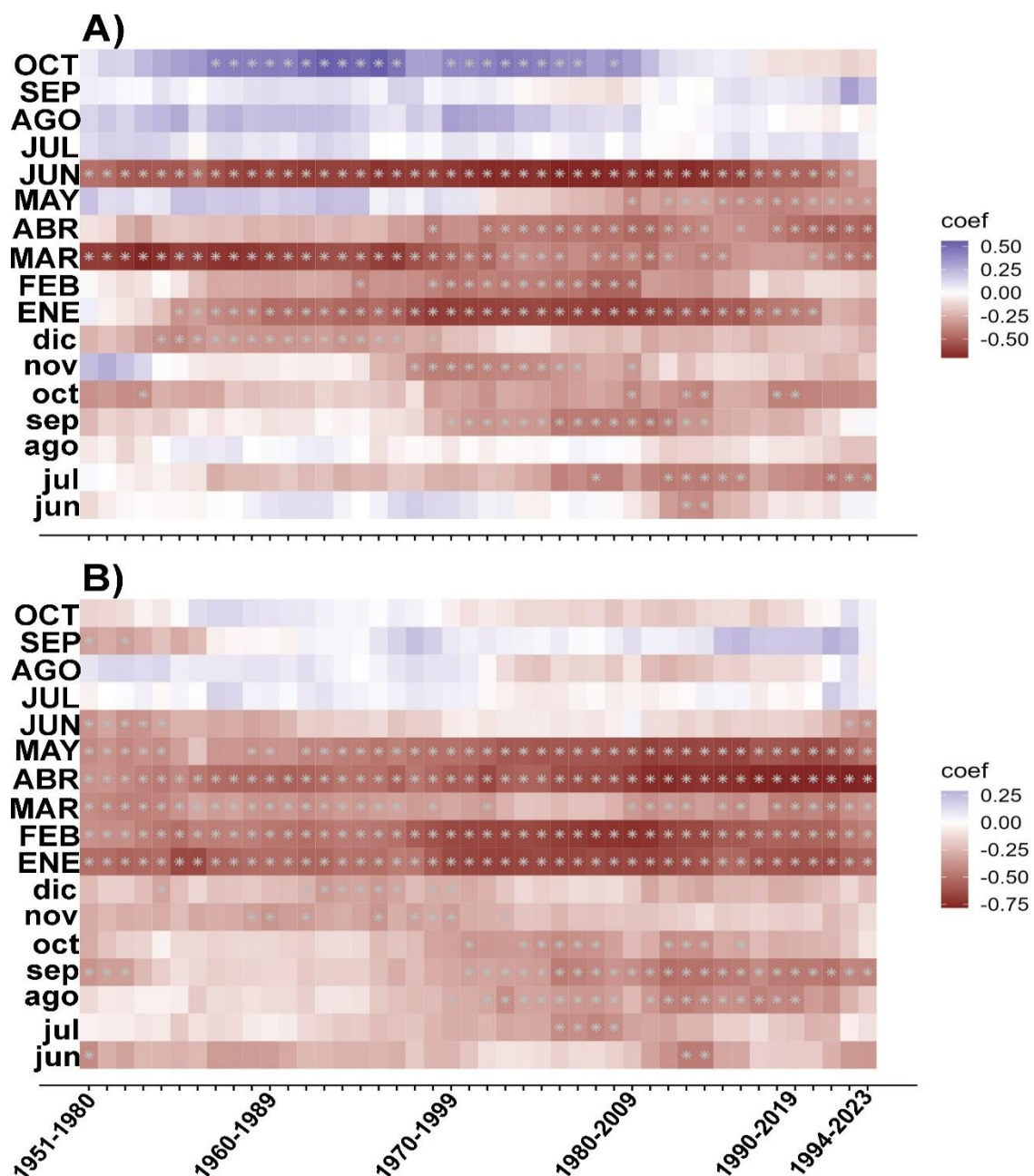


Figura 8. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las variables climáticas: temperatura mínima mensual (A) y temperatura máxima mensual (B). En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$).

La influencia del VPD sobre el RWI mostró estabilidad a lo largo del tiempo para los meses de enero-mayo del año actual, con asociaciones negativas y significativas ($p < 0.05$) (Figura 9). Para esta ventana de análisis de 73 años, se registraron aumentos en las correlaciones que pasaron de $r = -0.72$ en la década de 1950 a $r = -0.88$ para finales del siglo XX e inicios del siglo XXI (1950-1959 [$r = -0.72$]; 1960-1969 [$r = -0.71$]; 1970-1979 [$r = -0.81$]; 1980-1989 [$r = -0.87$]; 1990-2023 [$r = -0.88$]), correlaciones negativas y significativas ($p < 0.05$) cada vez más altas.

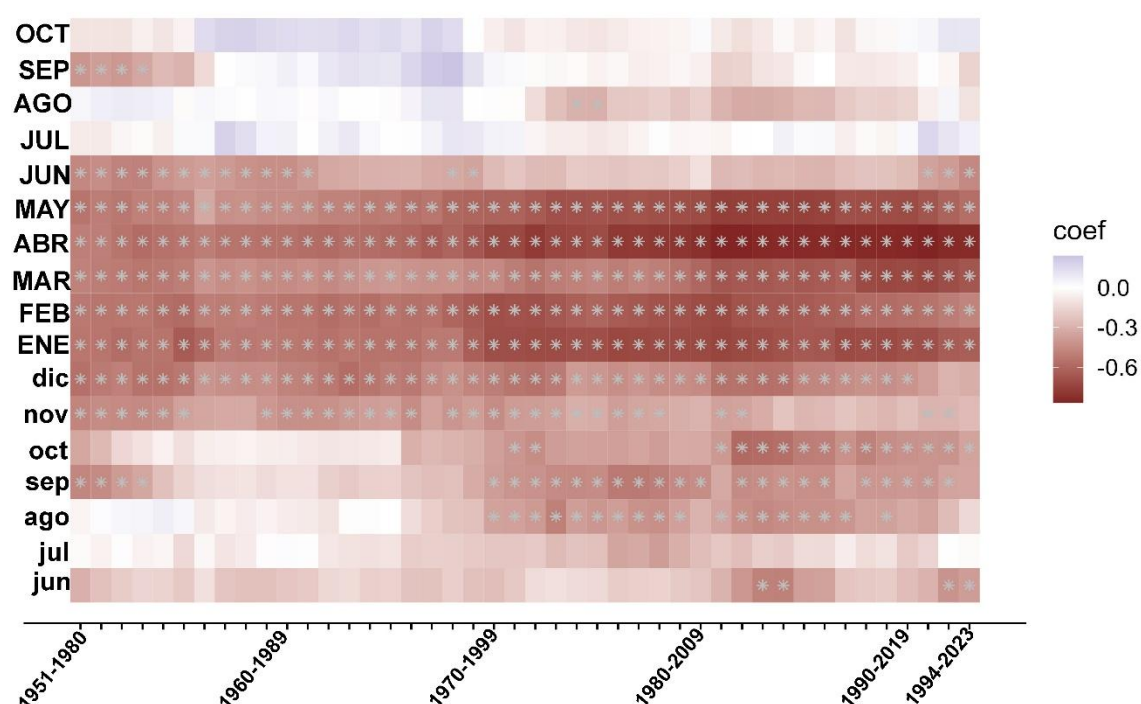


Figura 9. Correlación con ventana móvil entre el RWI regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y el déficit de presión de vapor. En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. Eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) dentro de una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$).

DISCUSIÓN

Desarrollo de cronologías

En este estudio se logró fechar el 92% de las muestras. Estudios realizados con núcleos de crecimiento de *P. menziesii* en México reportan porcentajes de fechado que varían del 71 al 98% (Miranda-Briones *et al.*, 2022; Cerano-Paredes *et al.*, 2024), esta variación se atribuye a problemas de crecimiento como anillos ausentes, falsos anillos y períodos de supresión (Cerano-Paredes *et al.*, 2022). De acuerdo con lo anterior, el porcentaje de fechado logrado con *P. menziesii* para este estudio, es aceptable. Esto indica alta sensibilidad a los cambios ambientales en sus crecimientos, lo cual se valida con los coeficientes de intercorrelación entre series (Cuadro 3) que superan el mínimo establecido por el programa COFECHA ($r \geq 0.3281$; $p < 0.01$) (Holmes, 1983).

La variabilidad explicada por el PC1 (Anexo 6) sugiere un patrón común en el crecimiento radial de *P. menziesii*, probablemente determinado por un factor climático regional, como la precipitación (Therrell *et al.*, 2002) o eventos de sequía (Williams *et al.*, 2013; Stahle *et al.*, 2016). En México, el PCA se ha empleado para la integración de series dendrocronológicas que presentan una misma variabilidad en su crecimiento (Cerano-Paredes *et al.*, 2011; Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Villanueva-Díaz *et al.*, 2022; Cerano-Paredes *et al.*, 2024). Utilizar técnicas de reducción de dimensionalidad como PCA en dendrocronología permite comprender la variabilidad climática en áreas extensas (Duchesne *et al.*, 2017).

La correlación móvil entre series (R_{bar}) de la cronología regional (Figura 3B) muestra una disminución a partir de 1720, mientras que el $EPS \geq 0.85$ se alcanza en 1699, esto coincide con la menor profundidad de muestra y mayor variabilidad en R_{bar} (Figura 3A, B). De acuerdo con Briffa y Jones (1990), el EPS depende de la profundidad de muestra. Por lo tanto, la cronología regional presenta un tamaño de muestra adecuado para el periodo de 1699-2023.

Influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial

El RWI de *P. menziesii* presenta una respuesta positiva a la PPT durante el periodo estacional invierno-primavera. Esto coincide con diversos estudios paleoclimáticos de *P. menziesii* y otras coníferas en la SMOc (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2009; Irby *et al.*, 2013; Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020; Miranda-Briones *et al.*, 2022). Asimismo, estudios en la Sierra Madre Oriental han mostrado respuesta positiva del crecimiento de *P. menziesii* a la PPT del periodo invierno-primavera (Pohl *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Cerano-Paredes *et al.*, 2024).

Aunque la precipitación invernal representa apenas el 14.6% del total anual, este estudio confirma que es determinante para el crecimiento radial de *P. menziesii*. La baja correlación con las lluvias de verano se explica porque en esta temporada los recursos se destinan al crecimiento de la copa (Fritts, 1976). Ecofisiológicamente, la humedad del suelo regula procesos esenciales como la transpiración, la fotosíntesis y la actividad cambial, que favorecen la formación de tejido leñoso (Kozlowski & Pallardy, 2002).

La cronología estándar del RWI de *P. menziesii* y la Tmin refleja una relación negativa significativa en los meses de marzo-junio. Contrario a lo reportado en estudios dendroclimáticos en la SMOc, González-Elizondo *et al.* (2005) no encontraron ninguna correlación entre la Tmin y el crecimiento radial de *P. menziesii*. Mientras que Cerano-Paredes *et al.* (2023) al correlacionar la Tmin con el RWI de *P. menziesii* únicamente reportan asociación positiva significativa con el mes de agosto del año actual.

En este estudio la Tmin limita el crecimiento radial de *P. menziesii* al influir en la actividad metabólica y en el inicio del crecimiento cambial (Turner *et al.*, 2003). Para *P. menziesii* y otras coníferas, la quiescencia post-letargo comienza a mediados de febrero y termina a principios de abril (Lavender & Hermann, 2014). La baja correlación entre la Tmin y la formación de anillos anuales podría explicarse por factores externos como la temperatura del suelo, el microclima del

sitio y la variación térmica asociada a la topografía (Rupp *et al.*, 2020; Kashian *et al.*, 2023).

La Tmax es otra de las variables que responde de manera negativa y significativa en el RWI de *P. menziesii* en los meses de enero-junio del año actual. La asociación negativa es similar con diversos estudios paleoclimáticos con *P. menziesii* y otras coníferas en la SMOc (González-Elizondo *et al.*, 2005; Pompa-García & Hadad, 2016; Chávez-Gándara *et al.*, 2017).

La respuesta negativa de *P. menziesii* a la Tmax puede ser explicada por el estrés hídrico ambiental que afecta el crecimiento en diámetro (Pallardy, 2008). En climas templados, los déficits de agua en el suelo tienden a presentarse a mitad de la temporada de crecimiento, cuando las temperaturas elevadas coinciden con la disminución del agua disponible procedente del deshielo invernal y las lluvias primaverales (Kashian *et al.*, 2023). Las altas temperaturas influyen en la dinámica del transporte hídrico a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera (Tyree & Zimmermann, 2002).

En este estudio el VPD presenta una fuerte asociación negativa entre el RWI de *P. menziesii* en los meses de enero-junio del año actual. En México, son escasos los estudios paleoclimáticos que incorporan la variable VPD en sus análisis (Morales-Estrada *et al.*, 2025). Recientemente, Cerano-Paredes *et al.* (2024) identificaron una fuerte relación negativa entre el VPD y el crecimiento de *P. menziesii* de enero-junio. En varias coníferas también se reporta una correlación negativa (Pompa-García *et al.*, 2022).

El estudio evidencia que el aumento del VPD ha reducido el crecimiento radial de *P. menziesii* en la SMOc, con un efecto negativo más marcado en las últimas décadas (Figura 9). Entre 1950-2023 se registraron valores elevados de VPD (Figura 10), que superan los 1.9 kPa en años como 1951, 1960, 1980, 1998, 2011 y 2023, los valores coinciden con lo reportado por Cerano-Paredes *et al.* (2024). Asimismo, Correa-Díaz *et al.* (2020) reportaron una disminución significativa de $\Delta^{13}\text{C}$ (isótopos estables) en los anillos de crecimiento durante la sequía de 2011, en coincidencia con el valor más alto de VPD registrado (Figura 10).

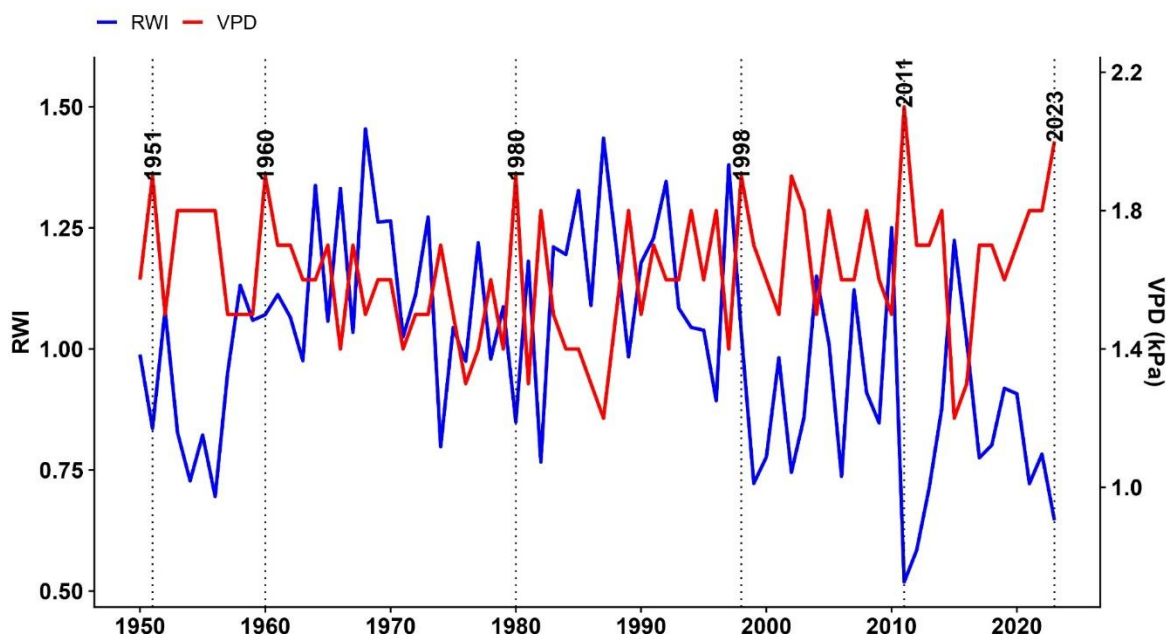


Figura 10. Valores del déficit de presión de vapor (VPD) y la cronología regional (RWI) de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el periodo de 1950-2023, en la Sierra Madre Occidental.

Un VPD superior a 2.0 kPa se asocia con una reducción en la fotosíntesis y la conductancia estomática en coníferas como *Pinus rubens* Sarg. (Day, 2000), y también reduce la transpiración de brotes de *P. menziesii* siempre que la temperatura supera los 24 °C (Leverenz, 1981).

Desde la década de 1990, el VPD ha mostrado una tendencia ascendente y se prevé que continúe (Yuan *et al.*, 2019). Este indicador se relaciona con múltiples factores de estrés para los ecosistemas forestales, como sequías edáficas y atmosféricas, incendios, brotes de insectos y la propagación de organismos invasores (Seidl *et al.*, 2017; Grossiord *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2023).

El VPD representa un desafío para la restauración y conservación forestal, incluso en soluciones climáticas basadas en bosques (Cook-Patton *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Este estudio aporta evidencia novedosa sobre el impacto del clima en el crecimiento radial de *P. menziesii* en la SMOc, al destacar los efectos negativos de la Tmin, Tmax y el VPD, y una influencia positiva de la PPT.

Es el primer análisis que evalúa la respuesta de *P. menziesii* al VPD en la SMOc, para el periodo de 1950-2023. Los resultados indican que la sequía atmosférica, asociada a la Tmax y VPD, presenta una relación negativa con el crecimiento radial. Además, se observó que estas correlaciones negativas se han intensificado progresivamente desde 1950 hasta las primeras décadas del siglo XXI.

Los resultados destacan al VPD como un indicador clave que se puede emplear para estimar la demanda evaporativa, con implicaciones para el manejo forestal en bosques templados frente al cambio climático.

REFERENCIAS

- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), art129. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Álvarez, M. (1961). Provincias fisiográficas de la República Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 24(2), 3–20. <http://doi.org/10.18268/BSGM1961v24n2a1>
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. P., & Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1), eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C., & Mechoso, C. R. (2019). A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. *Scientific Reports*, 9(1), 15331. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>
- Biondi, F. (2020). From dendrochronology to allometry. *Forests*, 11(2), 146. <https://doi.org/10.3390/f11020146>
- Bréda, N., Huc, R., Granier A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6) 625–644. <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>
- Breshears, D. D., Adams, H. D., Eamus, D., McDowell, N., Law, D. J., Will, R. E., Williams, A. P., & Zou, C. B. (2013). The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Frontiers in Plant Science*, 4, 266. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00266>
- Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1990). Basic chronology statistics and assessment. In E. R. Cook & L. A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences* (pp. 137–152). Kluwer Academic Publishers. <https://www.springer.com/gb/book/9780792305866>
- Broz, A., Retallack, G. J., Maxwell, T. M., & Silva, L. C. R. (2021). A record of vapour pressure deficit preserved in wood and soil across biomes.

Scientific Reports, 11 (1), 662. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80006-9>

- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Klesse, S., Mérian, P., Qeadan, F., & Zang, C. (2025). *dplR: Dendrochronology program library in R* (versión 1.7.8) [R package]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://CRAN.R-project.org/package=dplR>
- Cerano-Paredes, J., Avendaño-González, A., Muñoz-Villalobos, J. A., Cervantes Martínez, R., Jiménez-Jiménez, S., & Cornejo-Oviedo, E. H. (2024). Influencia del déficit de presión de vapor en el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii*. *Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 6(2), 44–52. <https://www.agrofaz.net/index.php/agrofaz/issue/view/13>
- Cerano-Paredes, J., Martínez-Sifuentes, A. R., & Cervantes Martínez, R. (2023). Sensibilidad del crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* a variables climáticas en el occidente del estado de Chihuahua, México. *Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 5(1), 53–60. 413 <https://agrofaz.net/index.php/agrofaz/issue/view/10>
- Cerano-Paredes, J., Szejner, P., Gutiérrez-García, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Arellano, J. R., Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., & Castruita-Esparza, L. U. (2022). How to extract climate variability from tree-rings. *Journal of Visualized Experiments*, 181, e63414. 418 <https://doi.org/10.3791/63414>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola Ávila, J. G., Sánchez Cohen, I., & Valdez Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–44. 403 <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521189>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Méndez González, J., & Constante García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(SPE2), 235-249. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a6.pdf>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Cruz-Cobos, F., & 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*

(Valdivia), 38, 387–399. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>

- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Diaz, J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369–388. <https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>
- Cook, E. R., & Peterson, N. (2011). Uncertainty, emergence, and statistics in dendrochronology. In M. K. Hughes, T. W. Swetnam, & H. F. Diaz (Eds.), *Dendroclimatology: Progress and prospects* (pp. 99–116). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_4
- Cook-Patton, S. C., Drever, C. R., Griscom, B. W., Hamrick, K., Hardman, H., Kroeger, T., Pacheco, P., Raghav, S., Stevenson, M., Webb, C., Yeo, S., & Ellis, P. W. (2021). Protect, manage and then restore lands for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 11(12), 1027–1034. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01198-0>
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., Suárez-Espinoza, J., & Velázquez-Martínez, A. (2020). From trees to ecosystems: Spatiotemporal scaling of climatic impacts on montane landscapes using dendrochronological, isotopic, and remotely sensed data. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(3), e2019GB006325. <https://doi.org/10.1029/2019GB006325>
- Day, M. E. (2000). Influence of temperature and leaf -to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiology*, 20(1), 57–63. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.1.57>
- 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. <https://doi.org/10.3354/cr022237>
- Duchesne, L., D’Orangeville, L., Ouimet, R., Houle, D., & Kneeshaw, D. (2017). Extracting coherent tree-ring climatic signals across spatial scales from extensive forest inventory data. *PLOS ONE*, 12(12), e0189444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189444>
- Fletcher, A. L., Sinclair, T. R., & Allen, L. H. (2007). Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered ‘slow-wilting’ and commercial soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 61(2), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.004>

- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780122684500/tree-rings-and-climate>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>
- García-Arévalo, A. (2008). Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea chihuahuana* Martínez del norte de México. *Polibotánica*, 25, 45–68.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682008000100005&lng=es
- 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-Elizondo, M., González-Elizondo, M. S., López-Enríquez, I. L., & Tena-Flores, J. A. (2017). Flora vascular. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Ed.), *La biodiversidad en Durango: Estudio de estado* (pp. 301–318). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*.
<https://www.cbd.int/doc/nbsap/study/mx-study-durango-es.pdf>
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Návar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.012>
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Groenendijk, P., Babst, F., Trouet, V., Fan, Z.-X., Granato-Souza, D., Locosselli, G. M., Mokria, M., Panthi, S., Pumijumnong, N., Abiyu, A., Acuña-Soto, R., Adenesky-Filho, E., Alfaro-Sánchez, R., Anholetto Junior, C. R., Aragão, J. R. V., Assis-Pereira, G., Astudillo-Sánchez, C. C., Barbosa, A. C., Barreto, N. de O., Battipaglia, G., Beeckman, H., Botosso, P. C., Bourland, N., Bräuning, A., Brien, R., Brookhouse, M., Buajan, S., Buckley, B. M., Camarero, J. J., Carrillo-Parra, A., Ceccantini, G., Centeno-Erguera, L. R., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Chanthorn, W., Chen, Y.-J., Cintra, B. B. L., Cornejo-Oviedo, E. H., Cortés-Cortés, O., Costa, C. M., Couralet, C., Crispin-DelaCruz, D. B., D'Arrigo, R., David, D. A., De Ridder, M., Del Valle, J. I., Díaz-Carrillo, O. A., Dobner, M., Doucet, J.-L., Dünisch, O., Enquist, B. J., Esemann-Quadros, K., Esquivel-Arriaga, G., Fayolle, A.,

- Fenilli, T. A. B., Ferrero, M. E., Fichtler, E., Finnegan, P. M., Fontana, C., Francisco, K. S., Fu, P.-L., Galvão, F., Gebrekirstos, A., Giraldo, J. A., Gloor, E., Godoy-Veiga, M., Guerra, A., Haneca, K., Harley, G. L., Heinrich, I., Helle, G., Hernández-Díaz, J. C., Hornink, B., Hubau, W., Inga, J. G., Islam, M., Jiang, Y.-M., Kaib, M., Khamisi, Z. H., Koprowski, M., Layme, E., Leffler, A. J., Ligot, G., Lisi, C. S., Loader, N. J., Lobo, F. d. A., Longhi-Santos, T., Lopez, L., López-Hernández, M. I., Lousada, J. L. P. C., Manzanedo, R. D., Marcon, A. K., Maxwell, J. T., Mendivelso, H. A., Mendoza-Villa, O. N., Menezes, Í. R. N., Montóia, V. R., Moors, E., Moreno, M., Muñoz-Castro, M. A., Nabais, C., Nathalang, A., Ngoma, J., Nogueira Jr., F. d. C., Oliveira, J. M., Olmedo, G. M., Ortega-Rodriguez, D. R., Ortíz, C. E. R., Pagotto, M. A., Paredes-Villanueva, K., Pérez-De-Lis, G., Ponce Calderón, L. P., Portal-Cahuana, L. A., Pucha-Cofrep, D. A., Quadri, P., Rahman, M., Ramírez, J. A., Requena-Rojas, E. J., Reyes-Flores, J., Ribeiro, A. d. S., Robertson, I., Roig, F. A., Roquette, J. G., Rubio-Camacho, E. A., Sánchez-Salguero, R., Sass-Klaassen, U., Schöngart, J., Scipioni, M. C., Sheppard, P. R., Silva, L. C. R., Slotta, F., Soria-Díaz, L., Sousa, L. K. V. S., Speer, J. H., Therrell, M. D., Ticse-Otarola, G., Tomazello-Filho, M., Torbenson, M. C. A., Touchan, R., Van Den Bulcke, J., Vázquez-Selem, L., Velázquez-Pérez, A. H., Venegas-González, A., Villalba, R., Villanueva-Díaz, J., Vlam, M., Vourlitis, G., Wehenkel, C., Wils, T., Zavaleta, E. S., Zewdu, E. A., Zhang, Y.-J., Zhou, Z.-K., & Zuidema, P. A. (2025). The importance of tropical tree-ring chronologies for global change research. *Quaternary Science Reviews*, 355, 109233. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109233>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Guo, Q., Potter, K. M., Ren, H., & Zhang, P. (2023). Impacts of exotic pests on forest ecosystems: An update. *Forests*, 14(3), 605. <https://doi.org/10.3390/f14030605>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78. <http://hdl.handle.net/10150/261223>

- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- 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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61727444007>
- IUSS Working Group [WRB]. (2022). *World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS). <https://wrb.isric.org/documents/>
- Jalakas, P., Takahashi, Y., Waadt, R., Schroeder, J. I., & Merilo, E. (2021). Molecular mechanisms of stomatal closure in response to rising vapour pressure deficit. *New Phytologist*, 232(2), 468–475. <https://doi.org/10.1111/nph.17592>
- Kashian, D. M., Zak, D. R., Barnes, B. V., & Spurr, S. H. (2023). *Forest ecology* (5th ed.). <https://www.wiley.com/en-be/Forest+Ecology%2C+5th+Edition-p-9781119476146#download-product-flyer>
- Kozlowski, T. T., & Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *Botanical Review*, 68, 270–334. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2002\)068\[0270:AAAROW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2002)068[0270:AAAROW]2.0.CO;2)
- Lavender, D. P., & Hermann, R. K. (2014). *Douglas-fir: the genus Pseudotsuga*. <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/defaults/sf268560k>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: Interactions with apical control. *Canadian Journal of Botany*, 59(12), 2568–2576. <https://doi.org/10.1139/b81-308>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2015). The evolution of mechanisms driving the stomatal response to vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 167(3), 833–843. <https://doi.org/10.1104/pp.114.252940>
- Miranda-Briones, R., Cerano-Paredes, J., Esquivel-Arriaga, G., Morató-Farreras, J., Cervantes-Martínez, R., Sánchez-Cohen, I., & Gómez-Nísino, A. (2022). Variabilidad de la precipitación (1660–2018) para el oeste de

- Chihuahua inferida con anillos de árboles. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 349–366. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.08.052>
- Morales-Estrada, R., Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Villanueva-Morales, A., & Monterroso-Rivas, A. I. (2025). La dendrocronología en los últimos setenta años en México. *Current Topics in Agronomic Science*, 5. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2024.05.01>
- Muñoz, S. J. (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- Noriega-Villa, J., González-Gallegos, J. G., Machado-Palacio, R., González-Elizondo, M. S., Ruacho-González, L., López-Enríquez, I. L., & Castro-Castro. (2023). Flora vascular y vegetación del área de protección de recursos naturales Quebrada de Santa Bárbara. *Botanical Sciences*, 101(4), 1184–1206. <https://doi.org/10.17129/botsoci.3294>
- Novick, K. A., Ficklin, D. L., Grossiord, C., Konings, A. G., Martínez-Vilalta, J., Sadok, W., Trugman, A. T., Williams, A. P., Wright, A. J., Abatzoglou, J. T., Dannenberg, M. P., Gentine, P., Guan, K., Johnston, M. R., Lowman, L. E. L., Moore, D. J. P., & McDowell, N. G. (2024). The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems. *Plant, Cell & Environment*, 47(9), 3561–3589. <https://doi.org/10.1111/pce.14846>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants* (3rd ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780120887651/physiology-of-woody-plants>
- Plomion, C., Leprovost, G., & Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. *Plant physiology*, 127(4), 1513–1523. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1540185/>
- Pohl, K., Therrell, M. D., Blay, J. S., Ayotte, N., Hernandez, J. J. C., Castro, S. D., Oviedo, E. C., Elvir, J. A., Elizondo, M. G., Opland, D., Park, J., Pederson, G., Salazar, S. B., Selem, L. V., Diaz, J. V., & Stahle, D. W. (2003). A cool-season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico. *Tree-Ring Research*, 59(1), 11–19. <http://hdl.handle.net/10150/262547>
- Pompa-García, M., & Hadad, M. A. (2016). Sensitivity of pines in Mexico to temperature varies with age. *Atmósfera*, 29(3), 209–219. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.03.03>
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., Valeriano, C., & Vivar-Vivar, E. D. (2022). Climate sensitivity of seasonal radial growth in young stands of Mexican

- conifers. *International Journal of Biometeorology*, 66(8), 1711–1723. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02312-3>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rathgeber, C. B. K. (2017). Conifer tree-ring density inter-annual variability – anatomical, physiological and environmental determinants. *New Phytologist*, 216(3), 621–625. <https://doi.org/10.1111/nph.14763>
- Restaino, C. M., Peterson, D. L., & Littell, J. (2016). Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(34), 9557–9562. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602384113>
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59–64. <https://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm#Vol40>
- Rupp, D. E., Shafer, S. L., Daly, C., Jones, J. A., & Frey, S. J. K. (2020). Temperature gradients and inversions in a forested Cascade Range basin: Synoptic- to local-scale controls. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23), e2020JD032686. <https://doi.org/10.1029/2020JD032686>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Seager, R., Hooks, A., Williams, A. P., Cook, B., Nakamura, J., & Henderson, N. (2015). Climatology, variability, and trends in the U.S. vapor pressure deficit, an important fire-related meteorological quantity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(6), 1121–1141. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0321.1>
- 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 de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V.,

- Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., & Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Siegwolf, R. T. W., Roden, J., Brooks, J. R., & Saurer, M. (Eds.). (2022). *Tree Physiology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. <https://search.worldcat.org/es/title/460061751>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P., & Howard, I. M. (2016). The Mexican drought atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Stokes, M. A. & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press.
- 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(D14), ACL 6-1. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Turner, J., & Mitchell, S. J. (2003). The effect of short day treatments on containerized Douglas-fir morphology, physiology and phenology. *New Forests*, 26(3), 279–295. <https://doi.org/10.1023/A:1024406704381>
- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). The cohesion-tension theory of sap ascent. In *Xylem structure and the ascent of sap* (pp. 135–171). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0_3
- Vaganov, E. A., Hughes, M. K., & Shashkin, A. V. (2006). *Growth dynamics of tree rings: Images of past and future environments* (Vol. 183). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6>
- Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Sifuentes, A. R., Loera-Chaparro, R., & Estrada-Ávalos, J. (2020). Variabilidad hidroclimática del suroeste de Chihuahua inferida con anillos de crecimiento de coníferas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 373–389. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.09.071>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring

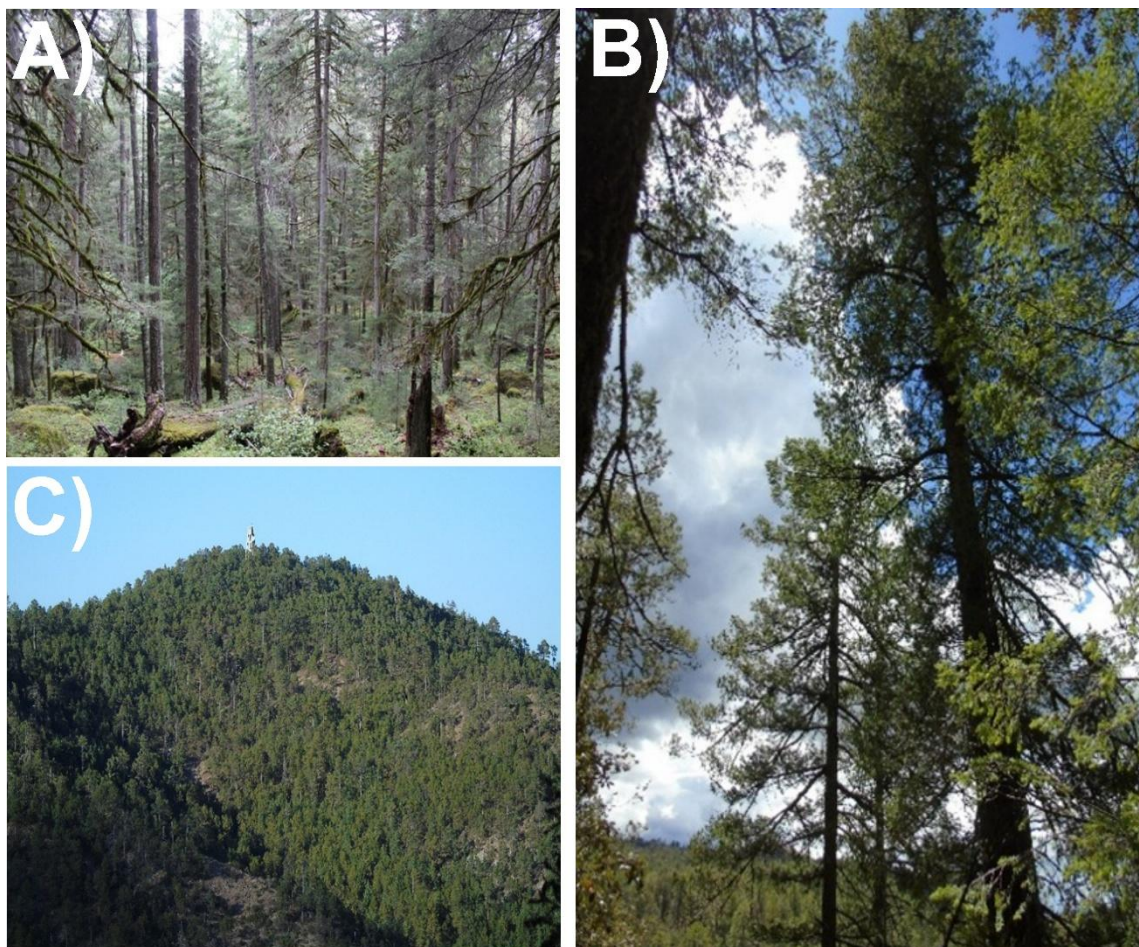
- precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Poulos, H. M., Therrell, M. D., Howard, I., Martínez-Sifuentes, A. R., Hermosillo-Rojas, D., Cerano-Paredes, J., & Estrada-Ávalos, J. (2022). Climate and the radial growth of conifers in Borderland Natural Areas of Texas and Northern Mexico. *Atmosphere*, 13(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/atmos13081326>
- VoorTech. (2021). *Measure J2X software: The tree ring measuring program project*. J2X. VoorTech. <https://www.voortech.com/projectj2x/release/index.html>
- Williams, A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Swetnam, T. W., Rauscher, S. A., Seager, R., Grissino-Mayer, H. D., Dean, J. S., Cook, E. R., Gangodagamage, C., Cai, M., & McDowell, N. G. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 3(3), 292–297. <https://doi.org/10.1038/nclimate1693>
- World Bank Group [WBG]. (2023). *Climate risk country profile: Mexico*. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15634-WB_Mexico%20Country%20Profile-WEB%20%282%29.pdf
- Yuan, W., Zheng, Y., Piao, S., Ciais, P., Lombardozzi, D., Wang, Y., Ryu, Y., Chen, G., Dong, W., Hu, Z., Jain, A. K., Jiang, C., Kato, E., Li, S., Lienert, S., Liu, S., Nabel, J. E. M. S., Qin, Z., Quine, T., Sitch, S., Smith, W. K., Wang, F., Wu, C., Xiao, Z., & Yang, S. (2019). Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 5(8), eaax1396. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38, 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
- Zhuang, J., Yu, G.-R., & Nakayama, K. (2014). A series RCL circuit theory for analyzing non-steady-state water uptake of maize plants. *Scientific Reports*, 4(1), 6720. <https://doi.org/10.1038/srep06720>
- Zuidema, P. A., Babst, F., Groenendijk, P., Trouet, V., Abiyu, A., Acuña-Soto, R., Adeniesky-Filho, E., Alfaro-Sánchez, R., Aragão, J. R. V., Assis-Pereira, G., Bai, X., Barbosa, A. C., Battipaglia, G., Beeckman, H., Botosso, P. C., Bradley, T., Bräuning, A., Brienen, R., Buckley, B. M., Bussotti, F., Butz, R. J., Caetano Andrade, A., Camarero, J. J., Cardoso, J. A., Carrer, M., Ceccantini, G., Cheesman, A. W., Cherubini, P., Ciais, P., Cook, E. R., Corrales, L. E., Couralet, C., da Costa, A. C. L., da Silva Junior, C. A.,

D'Arrigo, R. D., De Ridder, M., Di Filippo, A., Drew, D., Duque, Á., Enquist, B. J., Fontes, C. G., Fouchard, B., Gamarra, R., Gebrekirstos, A., Gloor, E., Granato-Souza, D., Grau, H. R., Griffiths, C. J., Grossi, M. A., Gutierrez, E., Hietz, P., Hijmans, R. J., Holmes, R. L., Kitzberger, T., Klockow, P. A., Laumer, W., Leite, M. R. P., Locosselli, G. M., Lopez, L., López-Sáez, J. A., Lorenzo, C., Lough, J. M., Makhado, R. A., Mbow, C., Moscoso, M. L., Moya, R., Musin, K., Natalini, F., Neukom, R., Ochoa-Gaona, S., Palacios, S., Patrut, A., Patrut, R. T., Pélissier, R., Penone, C., Perkin, J., Pucha-Cofrep, D., Ramírez, F., Rather, T. A., Rehfeld, K., Roig, F. A., Routh, D., Rozendaal, D. M. A., Rungwattana, K., Ruslandi, Sanoja, E. R., Santini, F., Schöngart, J., Schulz, M., Sekhwela, M. B. M., Sevanto, S., Shanley, R., Singh, K. K., Smith, M. N., Southon, J., Stahle, D. W., Suárez, M. L., Terrazas, T., Thomas, E., Tarelkin, Y. A., Toledo, M., Tomazello-Filho, M., Tschopp, S., Uhl, E., Unkelbach, J., Villalba, R., Vlam, M., Wang, R., Wartchow, F., Wils, T., Worbes, M., Xu, C., Xu, G., Yang, B., Zafra-Calvo, N., Zhang, Y., Zheng, Y., & Zhou, Z.-K. (2022). Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience*, 15(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8>

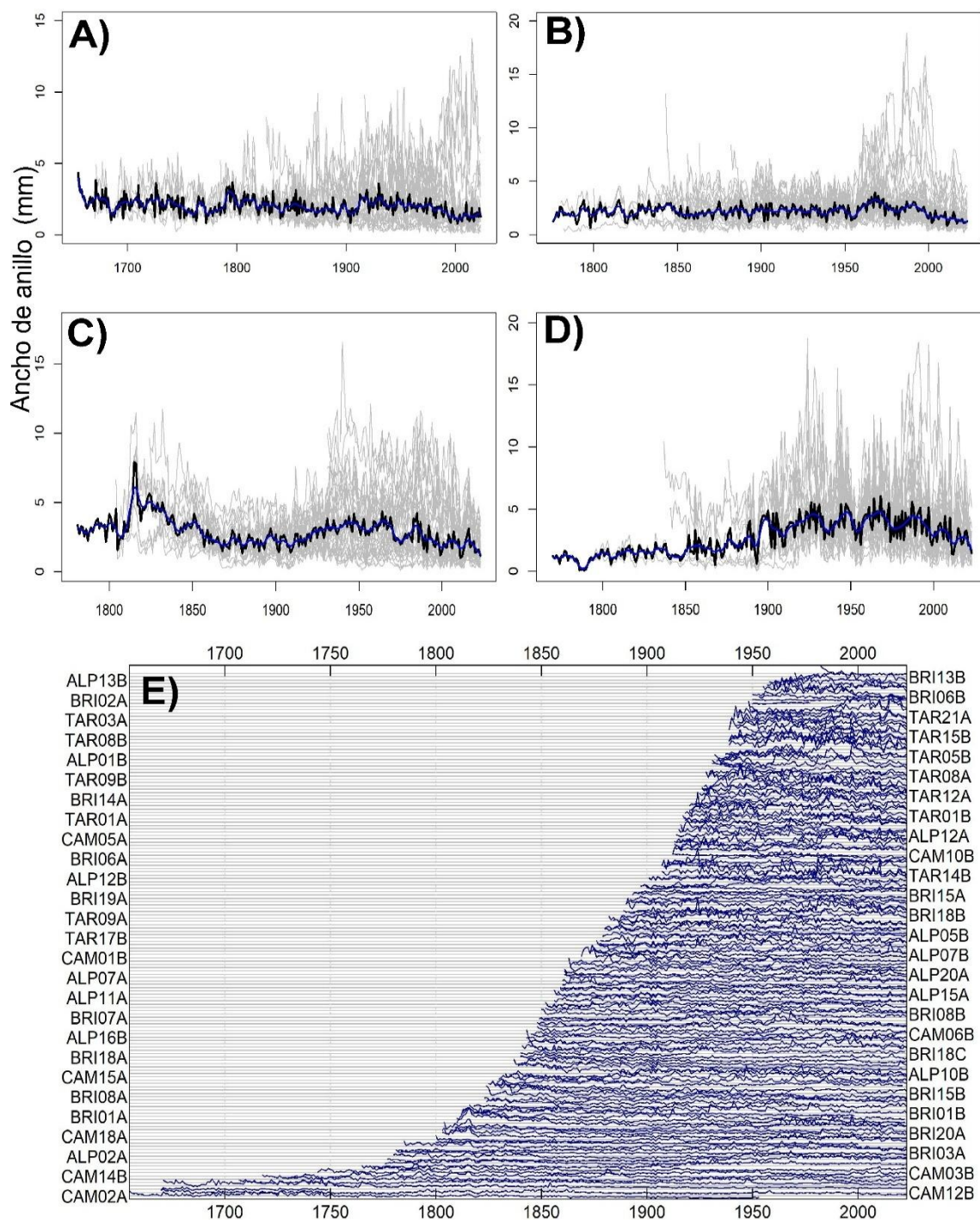
ANEXOS

Anexo 1. Características geográficas y físicas de los sitios de muestreo de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Occidental.

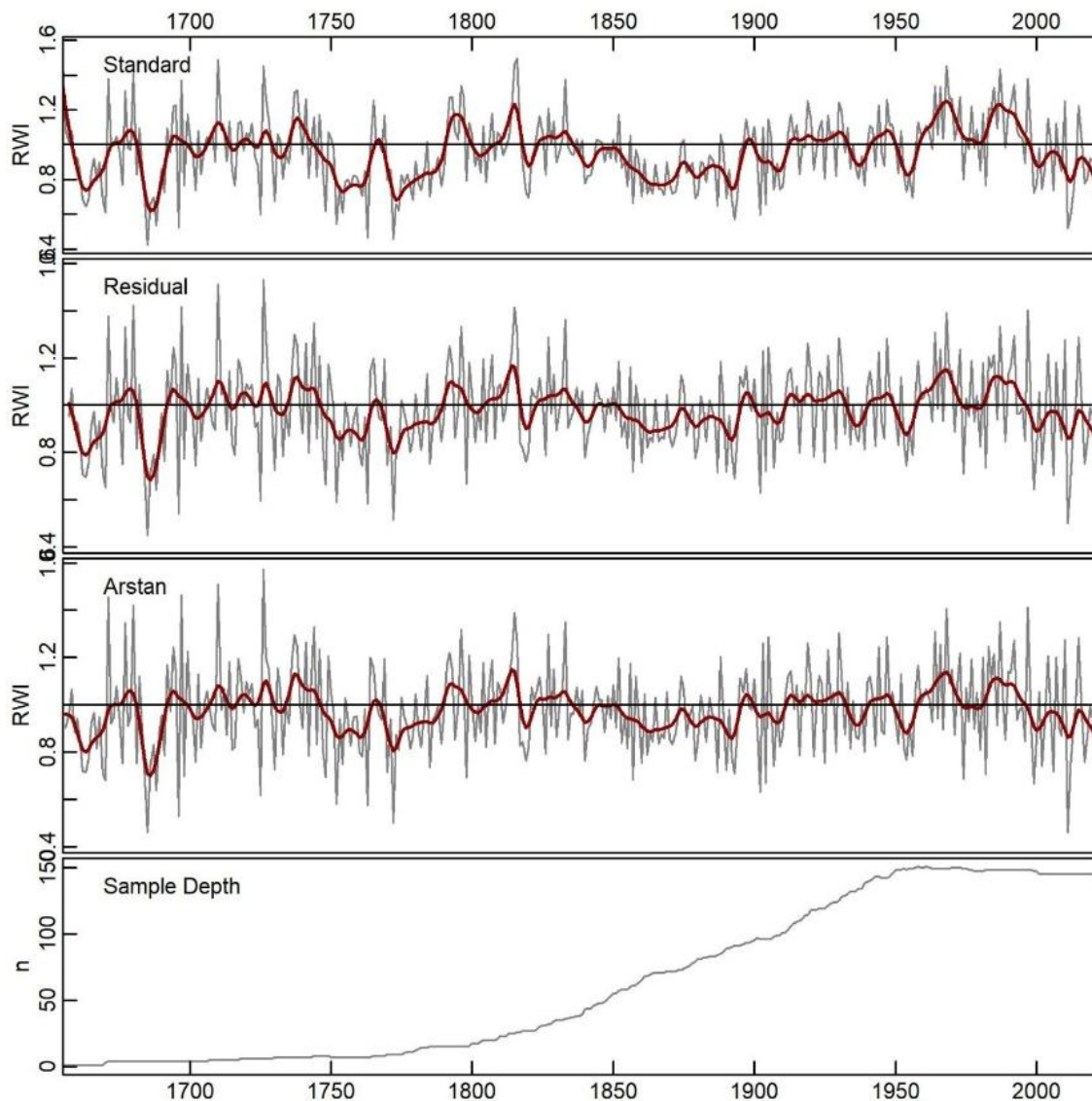
	Campo Verde	Arroyo Laja	El	El Brillante
		Prieta	Tarahumar	
Clave sitio	CAM	ALP	TAR	BRI
Latitud	29.515 N	28.014 N	25.593 N	23.660 N
Longitud	-108.423 O	-107.791 O	-106.327 O	-105.437 O
Altitud (m)	2530	2390	2715	2730
Fecha colecta	29 de octubre 2024	6 de julio 2024	3 de julio 2024	1 de julio 2024
Pendiente%	33	42	37	20
No. árboles	20	20	22	20
No. de muestras	42	45	47	45
Diámetro normal	84.4	48	62	82
Aspecto	Sierra	Meseta	Meseta	Sierra
Exposición	Noreste	Noreste	Noreste	Noroeste
Vegetación	Bosque mixto de coníferas de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, <i>Pinus arizonica</i> Engelm. y <i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltdl.			



Anexo 2. Rodales representativos del área de estudio sitio El Brillante (A) sitio Campo Verde (B) y ejemplar de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el sitio El Tarahumar (C).



Anexo 3. Series de ancho de anillo total bruto de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, generada con sistema Velmex y el software MeasureJ2X, sin estandarizar, que representa el crecimiento radial anual. Sitio Campo Verde (A), Arroyo Laja Prieta (B), El Tarahumar (C) y El Brillante (D). Gráfico de espagueti de las series temporales de los cuatro sitios (E).



Anexo 4. Cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Occidental, representada en tres versiones: Standard, Residual y Arstan. Spline de 10 años (línea roja). La gráfica inferior presenta la profundidad muestral (Sample Depth) anual (n).



Anexo 5. Coeficientes de correlación lineal entre las cuatro series de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Occidental. Sitio Campo Verde (CAM), sitio Arroyo Laja Prieta (ALP), sitio El Tarahumar (TAR) y sitio El Brillante (BRI).

Anexo 6. Componentes principales, valores propios y porcentaje de varianza explicada en el análisis de cuatro índices de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Occidental.

Componente	Valor propio (Eigenvalue)	Porcentaje de varianza (%)	Porcentaje de varianza acumulada (%)
1	2.53	63.4	63.4
2	0.66	16.5	79.89
3	0.51	12.8	92.69
4	0.29	7.3	100

Nota: La retención óptima de componentes se basó en la regla de Kaiser (Eigenvalue > 1).

Anexo 7. Coeficientes de correlación y significancia estadística entre la precipitación y el índice de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Sierra Madre Occidental, a partir del análisis de funciones de correlación con bootstrapping al 95% de confianza.

Mes	Coeficientes	Intervalo de confianza inferior	Intervalo de confianza superior
jun	0.14	-0.12	0.35
jul	-0.19	-0.40	0.06
ago	0.14	-0.11	0.35
sep	0.16	-0.09	0.36
oct	0.14	-0.10	0.36
nov	0.42*	0.19	0.62
dic	0.54*	0.35	0.69
ENE	0.43*	0.27	0.57
FEB	0.37*	0.17	0.53
MAR	0.43*	0.27	0.57
ABR	0.52*	0.37	0.63
MAY	0.36*	0.16	0.52
JUN	0.06	-0.19	0.27
JUL	0.03	-0.22	0.26
AGO	0.09	-0.12	0.27
SEP	0.09	-0.14	0.29
OCT	-0.08	-0.29	0.13
PA	nov-MAY	---	---
Coef. PA	0.76*	0.67	0.84

Nota: Los meses escritos en minúsculas corresponde al año previo, mientras que los meses en mayúsculas corresponden al año actual. PA indica los meses del periodo acumulado. Los coeficientes cuyo intervalo de confianza no incluye el valor cero se consideran estadísticamente significativos ($p < 0.05$) y están marcados con un asterisco (*).

Anexo 8. Coeficientes de correlación y significancia estadística entre la temperatura mínima y el índice de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Sierra Madre Occidental, a partir del análisis de funciones de correlación con bootstrapping al 95% de confianza.

Mes	Coeficientes	Intervalo de confianza inferior	Intervalo de confianza superior
jun	-0.23	-0.44	0.02
jul	-0.31*	-0.50	-0.08
ago	-0.23*	-0.42	-0.04
sep	-0.27*	-0.43	-0.08
oct	-0.31*	-0.53	-0.07
nov	-0.12	-0.36	0.10
dic	-0.22*	-0.38	-0.01
ENE	-0.25*	-0.48	-0.02
FEB	-0.22	-0.46	0.03
MAR	-0.52*	-0.67	-0.34
ABR	-0.34*	-0.50	-0.15
MAY	-0.16	-0.37	0.04
JUN	-0.55*	-0.68	-0.39
JUL	-0.10	-0.34	0.14
AGO	-0.11	-0.39	0.13
SEP	-0.13	-0.34	0.12
OCT	0.00	-0.25	0.23
PA	MAR-JUN	---	---
Coef. PA	-0.59*	-0.71	-0.41

Nota: Los meses escritos en minúsculas corresponde al año previo, mientras que los meses en mayúsculas corresponden al año actual. PA indica los meses del periodo acumulado. Los coeficientes cuyo intervalo de confianza no incluye el valor cero se consideran estadísticamente significativos ($p < 0.05$) y están marcados con un asterisco (*).

Anexo 9. Coeficientes de correlación y significancia estadística entre la temperatura máxima y el índice de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Sierra Madre Occidental, a partir del análisis de funciones de correlación con bootstrapping al 95% de confianza.

Mes	Coeficientes	Intervalo de confianza inferior	Intervalo de confianza superior
jun	-0.36*	-0.58	-0.13
jul	-0.20	-0.41	0.03
ago	-0.30*	-0.49	-0.11
sep	-0.37*	-0.54	-0.20
oct	-0.31*	-0.48	-0.11
nov	-0.29*	-0.44	-0.11
dic	-0.30*	-0.49	-0.09
ENE	-0.58*	-0.71	-0.41
FEB	-0.56*	-0.68	-0.41
MAR	-0.45*	-0.59	-0.29
ABR	-0.62*	-0.73	-0.46
MAY	-0.56*	-0.68	-0.42
JUN	-0.38*	-0.56	-0.17
JUL	-0.12	-0.35	0.10
AGO	-0.19	-0.40	0.03
SEP	-0.19	-0.42	0.05
OCT	-0.22*	-0.39	-0.01
PA	ENE-JUN	---	---
Coef. PA	-0.82*	-0.87	-0.75

Nota: Los meses escritos en minúsculas corresponde al año previo, mientras que los meses en mayúsculas corresponden al año actual. PA indica los meses del periodo acumulado. Los coeficientes cuyo intervalo de confianza no incluye el valor cero se consideran estadísticamente significativos ($p < 0.05$) y están marcados con un asterisco (*).

Anexo 10. Coeficientes de correlación y significancia estadística entre el déficit de presión de vapor y el índice de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Sierra Madre Occidental, a partir del análisis de funciones de correlación con bootstrapping al 95% de confianza.

Mes	Coeficientes	Intervalo de confianza inferior	Intervalo de confianza superior
jun	-0.30*	-0.52	-0.03
jul	-0.12	-0.33	0.11
ago	-0.22	-0.43	0.02
sep	-0.34*	-0.51	-0.15
oct	-0.32*	-0.52	-0.10
nov	-0.37*	-0.51	-0.21
dic	-0.51*	-0.64	-0.36
ENE	-0.64*	-0.74	-0.53
FEB	-0.60*	-0.72	-0.45
MAR	-0.60*	-0.71	-0.46
ABR	-0.72*	-0.81	-0.60
MAY	-0.65*	-0.75	-0.51
JUN	-0.43*	-0.60	-0.22
JUL	-0.08	-0.28	0.13
AGO	-0.18	-0.37	0.05
SEP	-0.26*	-0.46	-0.04
OCT	-0.09	-0.30	0.13
PA	ENE-JUN	---	---
Coef. PA	-0.84*	-0.89	-0.77

Nota: Los meses escritos en minúsculas corresponde al año previo, mientras que los meses en mayúsculas corresponden al año actual. PA indica los meses del periodo acumulado. Los coeficientes cuyo intervalo de confianza no incluye el valor cero se consideran estadísticamente significativos ($p < 0.05$) y están marcados con un asterisco (*).

Anexo 11. Código de Google Earth Engine para la descarga de datos climáticos mensuales.

```
// ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis
//1950-02-01 - present; Resolution: 2500 meters
//elaboro: Sergio Jiménez | GEE.HidraulicaFacil.com | www.hidraulicafacil.com
//-----Valores a modificar-----
var ainicial='1950-01-01'; //Fecha inicial (respetar el formato)
var afinal='2024-05-01'; //Fecha final
var latitud = 25.5883; //Latitud en grados decimales
var longitud = -103.4504; //longitud en grados decimales
var numero='TAR'; //Nombre Archivo sin espacios
//-----
var dataset = ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR')
    .filter(ee.Filter.date(ainicial, afinal));
//Coordenada del punto para extraer información
var Punto = ee.Feature(ee.Geometry.Point([longitud, latitud]), {label: 'Punto'});
var westernRegions = new ee.FeatureCollection([Punto]);
//Variables a extraer
var temperature =
dataset.select ('temperature_2m', 'temperature_2m_min', 'temperature_2m_max',
'dewpoint_temperature_2m', 'total_precipitacion_sum');
// Color de la ubicación del punto
var COLOR = {
    CITY: 'ff0000',
};
// selección de columnas para exportar
var data = ee.FeatureCollection(filtCol.map(function(image){
    return ee.Feature(null, image.reduceRegion(ee.Reducer.mean(),
westernRegions, 200))
    .set('DOY', ee.Date(image.get('system:time_start')).format('DDD'))
```

```

        .set('year', ee.Date(image.get('system:time_start')).format('yyyy'))
        .set('mon', ee.Date(image.get('system:time_start')).format('MM'))
        .set('day', ee.Date(image.get('system:time_start')).format('dd'));
    }));
// exportar variables a archivo CSV
Export.table.toDrive({collection: data,
    folder: "ERA_5Land",
    description: numero+'ERA-5',
    fileFormat: 'CSV',
    selectors: [longitud, latitud,
'year','mon','day','DOY','temperature_2m','temperature_2m_min','temperature_2
m_max','dewpoint_temperature_2m', 'total_precipitation_sum']})

```

Anexo 12. Código para el análisis de función de correlación entre el índice de ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las variables climáticas. Se utilizó la función dcc del paquete treeclim.

```

Cor <- dcc (
    chrono = grow.crn,
    climate = clim13.Pre,
    selection = .range(-6:10) + .sum(-11:5),
    method = "correlation",
    dynamic = "static",
    var_names = "PRE",
    ci = 0.05,
    boot = "std",
    sb = FALSE
)

```