

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Influencia de Variables Climáticas en el Crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)
Franco en la Gran Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental

Por:

ARELI AVENDAÑO GONZÁLEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Influencia de Variables Climáticas en el Crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)
Franco en la Gran Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental

Por:

ARELI AVENDAÑO GONZÁLEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo
Asesor Principal Interno



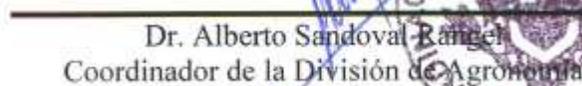
Dr. Julian Cerano Paredes
Asesor Principal Externo



Dr. Celestino Flores López
Coasesor



Dr. Jorge Méndez González
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal
ARELI AVENDAÑO G.
Areli Avendaño González

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

DEDICATORIA

A mis padres

Marcelino Avendaño Flores y Alberta González Fernández

Por darme la vida, por ser mi mejor ejemplo de constancia y dedicación, por ser mi fortaleza e inspiración diaria, por el apoyo incondicional, las enseñanzas y los sabios consejos para lograr el éxito en cada uno de mis triunfos y ser la persona que soy hoy. Son mi amor más grande y mi mayor orgullo, los amo.

A mi hermano

Israel Avendaño González

Por ser mi alegría, por siempre esperarme con mucha felicidad y travesuras, confiar siempre en mí y mostrarme como es la felicidad a través de la imaginación de un niño, sostener mi mano en cada momento y por darme tu cariño de manera incondicional, te amo.

A mi compañero de vida

Zafiro Alejandro Almaraz Herrera

Por ser el apoyo incondicional en cada uno de mis días, por estar a mi lado motivándome a alcanzar mis sueños y nunca dejar de creer en mí, por brindarme ese cariño, compañía y paciencia en cada momento, por amar mi locura y reír a mi lado. Eres mi por siempre y para siempre más bello, te amo mis ojitos bonitos.

A toda mi familia

Por sus palabras de aliento y sus buenos deseos, por darme la motivación a cumplir mis metas, por su cariño y apoyo durante los momentos difíciles y alegres de mi vida.

A Kia y Togo

Mis amores de cuatro patas por alegrar mis días con su compañía y hacer mi vida más feliz.

*A las familias Almaraz Herrera y Cerano Cervantes
Por brindarme un gran cariño y permitirme ser parte de su familia.
Para ustedes con mucho amor.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios. Por brindarme su sabiduría e inteligencia, por darme la bendición de culminar una etapa más en mi vida. Gracias señor por darme amor y todo lo maravilloso que me has dado.

A mi Alma Terra Mater. La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por ser mi hogar durante cinco años, regalarme las mejores vivencias y brindarme el mejor desarrollo académico y personal. Al Departamento Forestal por su excelente labor al formar Ingenieros Forestales con ética y visión.

Al Dr. Julián Cerano Paredes, por poner su confianza en mí para realizar el presente trabajo de investigación, por sus buenos consejos, su invaluable asesoría e incondicional apoyo, pero sobre todo por su amistad que perdurara por siempre.

A mi Comité de Asesoría. Asesor principal interno de tesis Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo y mis coasesores Dr. Celestino Flores López y Dr. Jorge Méndez González, por su apoyo, confianza y tiempo otorgado.

A mis profesores. Dra. Rosalinda Cervantes, Dr. Alejandro Zárate, Dr. Genaro García, M.C. Salvador Valencia, M.C. Armando Nájera, Ing. Sergio Braham, M.C. Melchor García, M.C. José Aniseto Díaz, M.C. Dario González, M.C. Andrés Nájera, M.C. Jorge Flores (†), Dr. Francisco Cruz, Dr. Rufino Sandoval, Ing. José Antonio Ramírez y Dr. Eduardo Lara, que durante el transcurso de mi carrera me transmitieron sus conocimientos contribuyendo a mi formación.

A mis mejores amigos y colegas de mi Alma Mater. Sofía De La Cruz, Marco Antonio Argueta, Martín Isidro y Kevin Lozena, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por sus consejos y ese cariño y apoyo que siempre me han brindado como hermanos.

A mis amistades. Alberto Urrieta, Abraham Isidro, Violeta Rangel, Sergio Jiménez, Edgar Velasco y Jimmy González por cada aventura y experiencia compartida, ser mi fuerza en cada momento y brindarme su cariño.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
Cambio climático	5
Los bosques y el cambio climático	5
Indicadores del Cambio Climático	5
Cambio climático en México.....	6
Dendrocronología	6
Dendrocronología en México	6
Dendroclimatología	7
Variabilidad climática	8
Generalidades de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	8
Déficit de presión de Vapor	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
Descripción del área de estudio	10
Localización geográfica.....	10
Hidrología	11
Geología.....	11
Edafología.....	11
Clima.....	11
Vegetación.....	11
Trabajo de campo	12
Diseño de muestreo.....	12
Colecta de muestras	12
Registro de información del sitio.....	12
Trabajo de laboratorio	13
Análisis dendrocronológico	13
Prefechado de crecimientos anuales	13
Medición de los anillos anuales	14
Verificación del fechado	14
Generación de cronologías.....	14

Análisis estadístico	15
Variabilidad común de las series.....	15
Análisis de Componentes Principales.....	15
Obtención de datos climáticos	16
Déficit de Presión de Vapor	16
Correlación de Pearson	18
Generación de modelos de regresión.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Fechado de muestras	19
Correlación entre series	20
Cronología regional	23
Respuesta del crecimiento de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco a las variables climáticas	25
Ancho de anillo total y madera temprana	25
Madera tardía	28
Temperatura mínima	30
Temperatura máxima	33
Precipitación	34
Respuesta del crecimiento a períodos acumulados o estacionales	36
Ancho de anillo total y madera temprana	36
Madera tardía	41
Temperatura máxima acumulada	43
Precipitación acumulada	44
Déficit de Presión de Vapor	47
V. CONCLUSIONES	49
VI. LITERATURA CITADA	50

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Coordenadas geográficas, altitud y período para descargar registros climáticos de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis para el análisis dendroclimático de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.	16
Cuadro 2. Parámetros dendrocronológicos de las series de crecimiento de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, muestreadas en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.	19
Cuadro 3. Matriz de correlación entre las cuatro diferentes cronologías de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco desarrolladas para la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.	21
Cuadro 4. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura mínima mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.	31
Cuadro 5. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura máxima mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.	33
Cuadro 6. Coeficientes de correlación (r) entre la precipitación mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.	35
Cuadro 7. Modelos de regresión que explican la mayor variabilidad y correlación entre los índices de crecimiento de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco y las variables climáticas en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.	38
Cuadro 8. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura máxima mensual acumulada y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.	43

Cuadro 9. Coeficientes de correlación (r) entre la precipitación mensual acumulada y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.46

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Sitios muestreados para la generación de cronologías de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental. a) yema de la especie y b) sección transversal de un árbol caído.	10
Figura 2. Longitud de cada una de las muestras y el tamaño de muestra que comprende cada uno los segmentos de la cronología regional o de cada muestra colectada de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.	21
Figura 3. Análisis de componentes principales de las muestras de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental; LAS: Sierra Las Alazanas; LVA: Sierra La Viga; LMA: Sierra La Marta; ETL: Sierra El Tarillal.	22
Figura 4. Análisis estadístico de EPS que indica estadísticamente el período de la cronología sustentado con un tamaño de muestra adecuado para fines de estudios de clima $EPS > 0.85$ (A). Cronología regional de ancho de anillo que muestra la variabilidad climática anual (B). Tamaño de muestra que indica la representatividad de la cronología por número de muestras (C); el área sombreada ya no indica la representatividad de la cronología por número de muestras.	24
Figura 5. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice del anillo total en las tres cronologías estándar, residual y arstan.	26
Figura 6. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera temprana en las tres cronologías estándar, residual y arstan.	27

Figura 7. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera tardía en las tres cronologías estándar, residual y arstan.29

Figura 8. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice del anillo total en las tres cronologías estándar, residual y arstan.37

Figura 9. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera temprana en las tres cronologías estándar, residual y arstan.40

Figura 10. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera tardía en las tres cronologías estándar, residual y arstan.42

Figura 11. Relación del déficit de presión de vapor con el anillo total, madera temprana y madera tardía con su cronología residual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.48

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar la correlación entre el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el déficit de presión de vapor (DPV) en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental (SMOr). Se seleccionaron 123 árboles en cuatro sitios diferentes (Sierra Las Alazanas, Sierra La Viga, Sierra La Marta y Sierra El Tarillal), se extrajeron 380 muestras con el apoyo de taladro de Pressler. Cada una de las muestras se analizó y fechó con base en técnicas dendrocronológicas estándar. Se fechó el 98.68% de las muestras con el apoyo del programa COFECHA y se generaron cuatro diferentes cronologías para lo cual se usó el programa ARSTAN. Un análisis de componentes principales (ACP) indicó variabilidad común entre las series y se desarrolló una cronología regional con una extensión de 313 años (1710 - 2022), la cual indica una correlación entre series de $r = 0.669$ ($p < 0.01$) y una sensibilidad media de 0.301. Registros climáticos se extrajeron de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis, los cuales comprendieron el periodo de 1950 a 2022 (73 años). Los datos climáticos se correlacionaron con los índices de ancho de anillo. El análisis de función de respuesta indica que, el DPV modula de manera negativa y altamente significativa ($r = -0.6649$; $p < 0.01$) el crecimiento de la especie para esta región de la SMOr. Así mismo se determinó que las variables climáticas que más influyen en el crecimiento de *P. menziesii* son: (1) la precipitación del periodo enero-abril ($r = 0.6310$, $p < 0.01$), (2) la temperatura media del periodo enero-junio ($r = -0.5999$, $p < 0.01$) y (3) la temperatura máxima del periodo enero-junio ($r = -0.5834$, $p < 0.01$). Dichas variables climáticas tienen potencial para ser reconstruidas y extender sus registros con base a las cronologías de esta especie.

Palabras clave: Dendroclimatología, variabilidad climática, anillo de crecimiento, déficit de presión de vapor.

I. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática tiene dos señales, una interna asociada a los procesos naturales del sistema climático, y otra externa, relacionada con las variaciones debidas al forzamiento antropogénico (Peixoto y Oort, 1992; Bigg, 1996). Comprender la variabilidad climática permite entender las tendencias climáticas actuales y ayudar en la gestión de recursos, la restauración y conservación de ecosistemas, la falta de registros climáticos observados extensos limita este análisis (Constante *et al.*, 2009). Los registros observados son demasiado cortos para examinar la variabilidad climática histórica (Cerano *et al.*, 2009).

Sin embargo, en los ecosistemas existen fuentes naturales que registran la variabilidad climática, tales como los anillos de crecimiento de árboles (Bradley, 1999). Estos constituyen la fuente indirecta más apropiada de resolución anual para entender el comportamiento histórico del clima, su crecimiento anual está influenciado por las condiciones climáticas dominantes previas o durante su formación; por lo que son una herramienta para el análisis de las condiciones climáticas en periodos en los que no existen registros instrumentales (Fritts, 1976).

La formación de nuevas células de crecimiento en un tallo de coníferas tiene lugar en el cámbium vascular, situado entre la corteza y la albura; el cámbium es el responsable de formar, durante la época de crecimiento, lo que se conoce como anillos anuales de crecimiento (Plomion *et al.*, 2001). En un anillo anual se observan dos bandas, un color claro y otra oscura, compuestas por células de tamaño, espesor y densidad diferentes, denominadas y diferenciadas, respectivamente, como madera temprana (células grandes con pared celular delgada color claro) y madera tardía (células de menor diámetro y pared celular gruesa color oscuro) (León-Hernández y Espinoza-de-Pernía, 2001).

En la formación del anillo anual influyen factores endógenos y exógenos (Plomion *et al.*, 2001). La influencia de estos factores y su variación determinan la formación de la madera temprana y tardía; la primera se produce en la estación de crecimiento de primavera a verano, y la segunda, de otoño a invierno (León-Hernández y Espinoza-de Pernía, 2001).

Los anillos de crecimiento permiten relacionar el crecimiento con variables climáticas, reconstruir el clima del pasado y generar indicadores de cambio climático (Klepac, 1976; Gómez-Guerrero *et al.*, 2015). La disciplina que se encarga de interpretar dichos registros, se conoce como dendrocronología (Benito, 2014), la cual se ha aplicado para estudiar los cambios ambientales del pasado al analizar los anillos de crecimiento anual de los árboles, basándose que el crecimiento radial de las especies leñosas es rítmico y de forma anual de acuerdo a condiciones ambientales determinadas por las estaciones del año (Stokes y Smiley, 1996).

El estudio del clima pasado mediante los anillos de crecimiento de los árboles se denomina dendroclimatología (Kaennel y Schweingruber, 1995; Luckman, 2007). Con esta ciencia es posible reconstruir el clima mediante modelos de regresión, gracias a la relación que existe entre los índices de crecimiento anual y los factores climáticos (González, 2003). Los anillos de crecimiento de árboles se han usado para realizar reconstrucciones dendroclimáticas en las comunidades forestales (Arreola-Ortiz *et al.*, 2010).

En México los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes, especialmente en bosques de coníferas del género *Pinus* (Stahle *et al.*, 2000). La riqueza biológica que el país posee genera un campo amplio de trabajo para desarrollar estudios de este tipo, tanto de especies de climas áridos y semiáridos, bosques templados y tropicales, como de hábitats riparios y montañosos de norte a sur (Villanueva *et al.*, 2009). Los bosques templados de las SMO y Sierra Madre Occidental (SMOc) tienen entre sus componentes especies arbóreas de coníferas con excelente potencial dendrocronológico (Stahle *et al.*, 1998).

Por ejemplo, Luna (2020) quien con el objetivo de evaluar el potencial dendroclimatológico en la especie *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl y determinar la relación descriptiva de la anchura de los anillos con la precipitación y temperatura en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, encontró una respuesta altamente significativa ($p < 0.01$) entre el índice de anillo de la cronología estándar y la temperatura mínima con una correlación de $r = 0.18$. El autor halló una respuesta altamente significativa ($p < 0.01$) entre el índice de anillo y la temperatura máxima con una correlación de $r = -0.20$. Así mismo el autor registró una correlación entre el índice de anillo y la precipitación de $r = 0.57$.

Una especie altamente sensible a la variabilidad climática es *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (*P. menziesii*) (Herman y Lavander, 1990; Villanueva *et al.*, 2008). La especie posee un gran potencial dendrocronológico (Cerano *et al.*, 2009), por ello es de amplio uso dendrocronológico en México y otras partes del mundo (Stahle *et al.*, 2000; Cleaveland *et al.*, 2003).

Gutiérrez (2014) menciona que la sincronía de las condiciones climáticas se refleja en el crecimiento de los árboles, debido a que gran porcentaje de la variación del crecimiento de un árbol es atribuido a las variables climáticas.

El déficit de presión de vapor (DPV) es la diferencia entre la cantidad de humedad en el aire y la cantidad de humedad que el aire puede contener al estar saturado, de tal manera que depende esta última de la temperatura ambiente; el DPV refleja el efecto de la temperatura y la precipitación sobre la humedad relativa y la demanda de transpiración, lo que estimula el cierre de las estomas para minimizar la pérdida de agua, por lo tanto, el flujo de agua y nutrientes del suelo a través de las plantas, en última instancia, a la atmósfera (Broz *et al.*, 2021).

El DPV puede limitar el crecimiento de los árboles (Breshears *et al.*, 2013; Williams *et al.*, 2013; Allen *et al.*, 2015), sin embargo, su importancia no ha sido del todo reconocida (Lendzion y Leuschner, 2008).

Aunado a lo anterior, no existe conocimiento sobre el impacto del DPV en el crecimiento de *P. menziesii* en México. Así mismo los escenarios de cambio climático indican fuertes variaciones en la temperatura y la precipitación que afectarán el crecimiento y desarrollo de la especie. Por lo tanto, el objetivo y la hipótesis de este estudio fueron los siguientes:

Objetivo:

Determinar la correlación entre el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *P. menziesii* con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

Hipótesis:

La hipótesis nula fue:

Ho: No hay correlación entre el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *P. menziesii* con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Cambio climático

En el último siglo se ha registrado un incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos (Stahle *et al.*, 1998; Fedorov y Phylander, 2001).

El cambio climático que se registra en las últimas décadas afecta de diversas maneras a los ecosistemas naturales (Hughes, 2000; Walther *et al.*, 2002; Parmesan y Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003). El cambio climático daña de manera directa el crecimiento y la fisiología de algunas plantas, lo que a su vez puede alterar la estructura y el funcionamiento de las comunidades vegetales y de los ecosistemas (Walker y Steffen, 1996; Hughes, 2000).

Los bosques y el cambio climático

Se considera a los bosques templados y tropicales como uno de los ecosistemas más vulnerables ante el fenómeno del cambio climático global (González *et al.*, 2010).

Existe un desacoplamiento entre las condiciones climáticas actuales y los requerimientos ambientales de los bosques (Smith *et al.*, 1992; Broolsma, 2010; Reich *et al.*, 2016). En términos biológicos, esta situación de alteración climática, ha dado lugar a que el crecimiento de los árboles, pueda extenderse por un mayor periodo de tiempo en las regiones más frías (Bentz *et al.*, 2010), mientras que los árboles en el límite de distribución altitudinal inferior y latitudinal hacia el Ecuador, se encuentran más estresados por sequía lo que ocasiona mortalidades masivas por falta de agua (Mátyás, 2010; Worrall *et al.*, 2013; Allen *et al.*, 2015).

Indicadores del Cambio Climático

Uno de los bioindicadores principales que se ha utilizado para detectar posibles respuestas al cambio climático es el crecimiento o aumento de biomasa vegetal (Sheppard y Cape, 2013).

El clima es uno de los factores de mayor incidencia en la estructura y características de la vegetación; este factor está formado por diversos elementos entre los cuales está la temperatura del aire, la temperatura del suelo, la humedad del aire, el viento, la radiación, etc. (Donoso, 1992).

La temperatura del aire ejerce un importante efecto sobre el desarrollo de los árboles forestales, como factor condicionador del crecimiento en altura (Aussenac, 1975). El aumento de la temperatura del aire afecta procesos directamente relacionados con el crecimiento como la tasa fotosintética y el uso eficiente del agua (González, 2003).

Cambio climático en México

México se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones bioclimáticas y socioeconómicas (Villers y Trejo, 1997; Ordóñez, 1999; Gay, 2000). Los bosques de México son extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1997).

Dendrocronología

Dadas las variaciones anuales de la precipitación y la temperatura del aire, es posible analizar y extraer información climática de los anillos anuales mediante técnicas y métodos dendrocronológicos (Gutiérrez, 2009).

La dendrocronología o fechado de anillos de árboles, se define como el estudio de la secuencia cronológica de anillos de crecimiento anual en árboles (Stokes y Smiley, 1968). Los anillos de crecimiento anual de especies arbóreas, representan enormes bancos de información de gran potencial para la construcción de modelos de predicción (Cook y Cole, 1991).

Las coníferas ocuparon un lugar predominante en el desarrollo de la dendrocronología debido a la simplicidad de su estructura leñosa, lo que facilita en gran medida la visibilidad de sus anillos de crecimiento (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988).

Dendrocronología en México

México se ha constituido en uno de los principales países de la región en la investigación sobre dendrocronología (Schulman, 1944; Schulman, 1956; Scott, 1966). Los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes, especialmente en bosques de coníferas del género *Pinus* (Stahle *et al.*, 2000).

En la última década la dendrocronología se ha convertido en una importante herramienta para los estudios en climatología en México (Huante *et al.*, 1991; Stahle y Cleaveland, 1993; Villanueva-Díaz y McPherson, 1995; Biondi y Fessenden, 1999; Biondi, 2001; Díaz *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2002). La gran mayoría de las cronologías de anillos de árboles disponibles para México, se han generado en los bosques templados y subtropicales del noroeste (Villanueva *et al.*, 2020).

Dendroclimatología

Los estudios sobre cambio climático se enfrentan a la escasez generalizada de registros meteorológicos pues, incluso en los países desarrollados, los registros climáticos confiables no se remontan más de 100 años (Easterling *et al.*, 1999).

La dendroclimatología es la disciplina que trata de obtener información climática a partir del estudio de los anillos de crecimiento anual de los árboles (Fritts, 1976; Kaennel y Schweingruber, 1995; Luckman, 2007).

La dendroclimatología permite reconstruir el clima mediante modelos de regresión gracias a la relación que existe entre los índices de crecimiento anual y los factores climáticos (González, 2003). La reconstrucción de factores climáticos del pasado constituye una base para el estudio de la variabilidad del clima y para el discernimiento entre las variaciones naturales y los cambios en el clima relacionados con actividades humanas, así como para la predicción de cambio climático en el futuro (Fritts, 1976).

Los anillos de los árboles de especies sensibles al clima conservan información acerca de los patrones cíclicos de crecimiento y de las relaciones con el clima, proporcionan información útil para propósitos de modelación y predicción (Matisons *et al.*, 2013; Návar y Lizárraga-Mendiola, 2013).

La mayoría de los estudios dendroclimáticos en México se han desarrollado con base en *P. menziesii*, especie que ha permitido reconstruir la variabilidad climática por varios siglos en el norte del país (Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011b; Cleaveland *et al.*, 2003).

Existen otros estudios dendroclimáticos con otra especie como el de Cortés-Cortés et al. (2021) que al analizar la respuesta del crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb en Guerrero desarrollaron una cronología de 228 años y reportan que es posible reconstruir la precipitación de primavera y la temperatura máxima de mayo a julio con base en los índices de anillo total ($r = 0.66$; $p < 0.01$) y madera tardía ($r = 0.35$; $p < 0.01$), respectivamente.

Variabilidad climática

La variabilidad del clima, la composición atmosférica, las características físicas y químicas del suelo, entre otros, modifican la formación de los anillos, además, el efecto de otros factores puede ser registrado por los anillos (Salinas, 2018).

El estudio de la variabilidad climática en el norte de México es importante ya que se relaciona con El niño/Oscilación del sur-ENSO- (Stahle *et al.*, 1998), fenómeno que afecta la variabilidad del clima a nivel mundial y que tiene un impacto particularmente fuerte sobre los patrones de humedad de las zonas subtropicales (Walker y Steffen, 1999).

Generalidades de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Pseudotsuga menziesii es una de las coníferas más importantes del mundo por su amplia distribución, por la superficie plantada en varios países y por su valor económico (Owston y Stein, 1974; Hermann y Lavender, 1999). La distribución natural de esta especie en México no es tan abundante, comprende bosques de los estados de Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Zacatecas en la SMOc, así como Nuevo León y Tamaulipas en la SMOr (Rzedowski, 2006; Domínguez *et al.*, 2010).

Esta especie se ha utilizado previamente con éxito en diferentes regiones del mundo, incluyendo en el norte de México (Villanueva-Díaz y MacPherson, 1996; Díaz *et al.*, 2002), para estudios dendroclimáticos debido a que muestra una marcada sensibilidad a variaciones en el clima y a otros factores ambientales que se registra en sus anillos de crecimiento anual (González-Elizondo *et al.*, 2005; Griesbauer y Scott, 2010; Cerano *et al.*, 2011b; Gugger *et al.*, 2011).

P. menziesii es una de las coníferas más longeva en México, individuos vivos de la especie registran edades cercanas a los 500 años y madera muerta, de la especie, con edades que superan los 600 años (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2011a).

Déficit de presión de Vapor

La función fisiológica del bosque depende en gran medida de la demanda atmosférica de agua, que está impulsada por dos factores: DPV y radiación neta (Barkhordarian *et al.*, 2019).

El DPV es la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real; la cual puede ser una medida del poder de secado del aire, por lo tanto, tiene importancia en la determinación de las velocidades relativas de evaporación del agua en contacto con el aire; en consecuencia, es una medida de la falta de equilibrio entre una superficie húmeda y el aire que sopla sobre ella (Passamai y Saravia, 2022).

Por lo general, el cierre de las estomas es el principal mecanismo de respuesta ante el déficit hídrico y a las altas temperaturas (Guehl y Aussenac, 1987; Guehl *et al.*, 1991). Las condiciones de disponibilidad de humedad reducen la sensibilidad de la conductancia del dosel a los cambios en el DPV (Liu *et al.*, 2018).

Es posible que bajo condiciones de los promedios mensuales de radiación neta y temperatura máxima superiores, y el bajo contenido de agua en el suelo, el arbolado se estrese, en consecuencia, se generen modificaciones significativas en la fisiología de los árboles que impactan en la productividad del ecosistema (Hidalgo-Sánchez, 2021). Sin embargo, esto dependerá de los mecanismos de respuesta y tolerancia que las plantas hayan desarrollado ante tales situaciones (Méndez-Espinoza y Vallejo, 2019).

Si únicamente las temperaturas altas son el problema, el arbolado continuará con la transpiración, ya que debido a su efecto de enfriamiento mantendrá una temperatura de la superficie foliar adecuada (Harfouche *et al.*, 2014).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización geográfica

Los sitios de estudio se localizaron en la provincia fisiográfica de la SMOr, subprovincia de la Gran Sierra Plegada, en cuyo macizo montañoso se obtuvieron muestras de *P. menziesii* de cuatro localidades diferentes: Sierra Las Alazanas (LAS) ($25^{\circ} 16' 43''$ N, $100^{\circ} 30' 30''$ W, 3232 msnm), Sierra La Viga (LVA) ($25^{\circ} 22' 16''$ N, $100^{\circ} 33' 26''$ W, 3444 msnm), Sierra La Marta (LMA) ($25^{\circ} 12' 25''$ N, $100^{\circ} 21' 40''$ W, 3240 msnm) y Sierra El Tarillal (ETL) ($25^{\circ} 26' 27''$ N, $100^{\circ} 32' 27''$ W, 2991 msnm) (Figura 1).

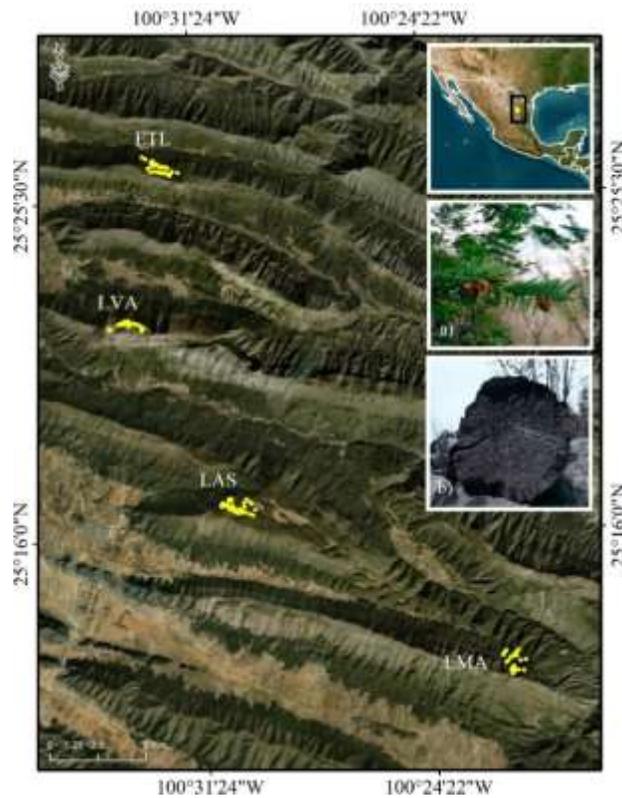


Figura 1. Sitios muestreados para la generación de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental. a) yema de la especie y b) sección transversal de un árbol caído.

Hidrología

La región hidrológica que conforma el área de estudio es la cuenca cerrada SMO_r (37A), con una extensión en el estado de Coahuila de 1293.77 km²; corresponde a esta cuenca en el estado una pequeña porción al sureste de Saltillo, que forma parte de la subcuenca intermedia de San Rafael (37AB); los escurrimientos superficiales en la cuenca son de 10 a 20 mm anuales (INEGI, 1983; INEGI, 1986).

Geología

Con respecto a la geología, predominan rocas mesozoicas de origen sedimentario marino, que fueron sometidas a esfuerzos corticales de tensión y compresión, y dieron lugar a levantamientos serranos abruptos compuestos de rocas caliza, que se alternan con valles intermontanos; afloran rocas del Jurásico Superior calizas, yesos, lutitas y areniscas y del Cretácico Inferior representado por asociaciones de ambos tipos de rocas, así como asociaciones de calizas-lutitas y lutitas-areniscas (INEGI, 1983; INEGI, 1986).

Edafología

Los suelos en su mayoría son litosoles, suelos con menos 10 cm de profundidad, en menor proporción rendzinas y pequeñas áreas esparcidas de regosol, calcárico y luvisol crómico (INEGI, 1983; INEGI, 1986).

Clima

El clima del área es templado subhúmedo con lluvias escasas todo el año, posee una precipitación anual entre 450 a un poco más de 500 mm; los porcentajes de lluvia invernal son relativamente altos; sin embargo, la precipitación alcanza sus niveles máximos en el verano; la temperatura media anual en estas áreas es de 13 °C (INEGI, 1983; INEGI, 1986).

Vegetación

La vegetación es dominada por bosques extensos, su extensión es discontinua y a menudo se representan en forma de bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus*; los bosques son constituidos principalmente por *P. menziesii*, *Pinus rudis* Endl., *Pinus ayacahuite* Ehren., *P. montezumae*,

Pinus arizonica Engelm., *P. teocote*, *Abies vejarii* Martínez., *Populus tremuloides* Michx., *Arbutus xalapensis* kunth. y *Quercus sp* (Rzedowski, 2006).

Trabajo de campo

Diseño de muestreo

El sistema de muestreo empleado en cada uno de los sitios de estudio fue, un muestreo selectivo. Se seleccionaron árboles longevos en la medida de lo posible y se procuró que presentaran un fuste o ramas en forma de espiral, corteza delgada, copa reducida con ramas gruesas colgantes, además de libres de daños mecánicos, plagas y enfermedades (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Colecta de muestras

La extracción de núcleos de crecimiento se llevó a cabo en el periodo de abril y junio del 2023. A cada árbol seleccionado se le extrajeron tres virutas a diferente altura del fuste, de manera tal de obtener una muestra sólida y completa. Las muestras se extrajeron con el apoyo de un taladro de Pressler de diferentes dimensiones y con diámetro de 5.15 mm.

Se colectaron 380 muestras en total de 123 árboles. Las muestras se distribuyeron en cada uno de los sitios de la siguiente manera: Sierra Las Alazanas (110), Sierra La Viga (90), Sierra La Marta (90) y Sierra El Tarillal (90). Cada muestra se colocó en un popote de plástico con orificios, esto último para facilitar la ventilación y evitar la formación de hongos.

Registro de información del sitio

Para cada sitio se llenó un formato que permitió registrar información geográfica (coordenadas, altitud, pendiente, exposición y nombre del sitio) y ecológica (tipo de vegetación, fisiografía, características del suelo, presencia de perturbaciones como incendios, plagas y enfermedades) del área, así como de cada uno de los árboles muestreados. Las muestras se etiquetaron con información específica del árbol y del sitio para una mejor interpretación de resultados en laboratorio. Los datos de identificación y ubicación de cada muestra se mostraron sobre los popotes y en cuaderno de campo.

Trabajo de laboratorio

La preparación y fechado de muestras se realizó de acuerdo con los procedimientos dendrocronológicos estándares (Stokes y Smiley, 1968; Swetnam *et al.*, 1985).

Las muestras se montaron en una moldura de madera, se adhirieron con pegamento, ajustándolas herméticamente a la moldura con cinta adhesiva. La orientación de la muestra al momento del montado, es de gran importancia, ya que de esto depende el observar con mayor claridad las bandas de crecimiento anual. Las células de la madera (traqueidas), deben quedar perpendiculares a los crecimientos anuales.

Una vez que las muestras estuvieron firmes en la moldura, se les retiró la cinta adhesiva, se pulieron con lijas de diferente grosor que oscilan entre 120 y 1200. Procedimiento que permite resaltar los anillos de crecimiento.

Análisis dendrocronológico

Prefechado de crecimientos anuales

El prefchado de las muestras se desarrolló en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP, Gómez Palacio, Durango. Los núcleos de crecimiento se analizaron con el apoyo de un estereomicroscopio.

El conteo de anillos se realizó marcando las décadas (un punto), períodos de cincuenta años (dos puntos) y períodos de cien años (tres puntos). Así mismo dos puntos paralelos se usaron para señalar microanillos, dos puntos alternos para señalar un anillo perdido y una línea diagonal para indicar un falso anillo. Se contaron los anillos en todas las muestras y con esto se determinó la edad aproximada de cada árbol, mediante el uso de técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968).

El prefchado se realizó mediante la técnica de Skeleton plots (gráficos de crecimiento) para encontrar patrones comunes de crecimiento (Stokes y Smiley, 1996).

Medición de los anillos anuales

Una vez concluido el prefechado, se midió para todas las muestras el ancho del anillo total (RW, por sus siglas en inglés), la longitud de madera temprana (EW, por sus siglas en inglés) y de la madera tardía (LW, por sus siglas en inglés). El ancho del anillo se midió con un sistema de medición Velmex con platina de fase deslizante con precisión de 0.001 mm, misma que está conectada a una computadora (Robinson y Evans, 1980). Para una mejor apreciación de los anillos de crecimiento se usó un estereoscopio con una retícula graduada que permite marcar el límite del anillo y las dos porciones de madera temprana y tardía. La base de datos generada de la medición se queda registrada en la computadora para lo cual se empleó el software Measure J2X (VoorTech, 2007).

Verificación del fechado

Los archivos de medición generados de cada uno de los sitios de colecta se ingresaron al programa COFECHA, para verificar la calidad de fechado y medición (Holmes, 1983). El programa analiza estadísticamente el fechado de cada serie y correlaciona sucesivamente en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, compara cada serie individual con todas las muestras y con la serie promedio, con base en este procedimiento se identifican errores de anillos ausentes y falsos (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Generación de cronologías

El término cronología de anillos de crecimiento se refiere a una serie de valores que representa los promedios de los índices de crecimiento anual estandarizados y debidamente fechados, obtenidos a partir de virutas extraídas de árboles de un sitio en particular (Fritts, 1976).

Una vez verificada la calidad del fechado y la medición con el programa COFECHA, se procedió a utilizar el programa ARSTAN para generar cronologías a partir de las series de ancho de anillo (anillo total, madera temprana y madera tardía) (Cook y Holmes, 1984).

Este programa realiza la estandarización de las series individuales de cada árbol, remueve la varianza debida a factores biológicos, tales como edad y crecimiento radial, así como la

varianza debida a la productividad entre micrositios y cambio en el ambiente de los árboles no relacionados con el clima, y maximiza la varianza debida a factores ambientales (factores climáticos y atmosféricos) que afectan a la población (Fritts, 1976; Cook, 1985; Cook y Kairiuskstis, 1990).

Para cada serie individual se obtuvo un índice de crecimiento, al dividir el valor del ancho del anillo (madera temprana y madera tardía) entre el valor correspondiente de la curva (Cook, 1987; Gutiérrez, 2009); finalmente, se promediaron los índices anuales de las series individuales para producir la cronología del sitio.

Con el programa ARSTAN se generaron tres cronologías estándar, residual y arstan, tres series de índices normalizados (cronologías) con media de 1.0 y varianza homogénea (Fritts 2001).

Análisis estadístico

Variabilidad común de las series

Finalizado el desarrollo de las cronologías para cada uno de los sitios, se corrió un análisis de correlación de Pearson, esto con el objetivo de determinar si las cuatro series registraban una relación significativa o poder observar cuales presentaban una relación diferente.

Análisis de Componentes Principales

Adicional al análisis de correlación, para corroborar dicha relación mediante un análisis estadístico más estricto, se corrió un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) para el período común de las cuatro cronologías (145 años; 1877-2022), lo cual permitió determinar el porcentaje de variabilidad común entre las cronologías, para su vez decidir con bases técnicas, entre trabajar con series individuales o integrar una cronología regional.

Obtención de datos climáticos

Para determinar la influencia de las variables climáticas en el crecimiento de *P. menziesii*, se descargaron registros climáticos de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis (Muñoz, 2019). Las variables que se extrajeron fueron precipitación y temperaturas (media, mínima, máxima y punto de rocío). Dichos valores fueron extraídos de forma mensual para el periodo de 1950 a 2022 (73 años) para cada uno de los cuatros sitios (Cuadro 1).

Cuadro 1. Coordenadas geográficas, altitud y período para descargar registros climáticos de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis para el análisis dendroclimático de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

Punto de Extracción	Coordenadas Geográficas		Altitud (msnm)	Periodo (años)
	Latitud (N)	Longitud (O)		
Sierra Las Alazanas	25.281	-100.506	3232	1950-2022
Sierra La Viga	25.368	-100.558	3444	
Sierra La Marta	25.204	-100.366	3240	
Sierra El Tarillal	25.441	-100.540	2991	

Déficit de Presión de Vapor

Adicional a las variables climáticas anteriores, las cronologías se relacionaron con el DPV, esto con el objetivo de observar la influencia de esta variable en el crecimiento de *P. menziesii*. El DPV se determinó al emplear las ecuaciones 1 y 2. La evapotranspiración (ET, Ecuación 1) se estima comúnmente al considerar la evapotranspiración de referencia (ET₀) y el coeficiente de la especie a estudiar (K_c). La primera se puede calcular al usar el manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006). Siendo el método de Penman Monteith (Ecuación 2) el más usado por su buena precisión para diferentes condiciones climáticas y regiones.

$$ETc = K_C * ET_0 \quad (1)$$

$$ET_{0-PM} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

Donde: Rn radiación neta en la superficie ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G flujo del calor de suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); e_s presión de vapor de saturación (kPa); e_a presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa); Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); γ constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); u_2 velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Para intervalos de tiempo diarios, los valores de G son relativamente pequeños, por lo tanto, el término es despreciado.

$$e_a = \left(\frac{RH}{100} \right) \cdot \left(0.6108 \cdot \exp \left[\frac{17.27 T_{mean}}{T_{mean} + 237.3} \right] \right)$$

$$e_a = \frac{SH \cdot P}{(0.622 + 0.378 \cdot SH)}$$

$$e_a = 0.6108 \cdot \exp \left[\frac{17.27 T_{rocio}}{T_{rocio} + 237.3} \right]$$

$$e_s = \frac{e^\circ(Tmax) + e^\circ(Tmin)}{2}$$

$$e^\circ(T) = 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]$$

Donde: $e^\circ(T)$ presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T (KPa); T temperatura del aire ($^\circ\text{C}$); \exp (..) 2.7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia.

Correlación de Pearson

Se realizaron pruebas estadísticas de correlación de Pearson entre las cronologías estándar, residual y arstan del anillo total, madera temprana y madera tardía, con los datos climáticos, esto con la finalidad de observar qué variable climática (temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y DPV) y qué periodo del año (mensual, bimensual, estacional o acumulado) influye más en el crecimiento de *P. menziesii*.

Generación de modelos de regresión

Finalmente, con el fin de conocer el potencial dendrocronológico de la especie para reconstruir variables climáticas, se corrieron modelos de regresión lineal simple al tomar como variable independiente las cronologías y como variable dependiente las variables climáticas, al utilizar el programa STATISTICA Kernel Release 5.5 (Stat Soft Inc, 2000).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fechado de muestras

De un total de 380 núcleos de crecimiento extraídos de 123 árboles de *P. menziesii* (tres muestras por árbol, aproximadamente) colectados en cuatro diferentes localidades de la SMOOr (Cuadro 2), se lograron fechar 375 muestras, que representan el 98.68% del total, el 1.32% restante no fue posible fechar por registrar problemas de crecimiento propiciados por las condiciones locales (competencia, liberaciones, incendios, plagas y enfermedades, entre otros).

Cuadro 2. Parámetros dendrocronológicos de las series de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, muestreadas en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

Nombre del sitio	Número de serie	Longitud de la serie (años)	IC	SM	D.E	AC	S/R
Sierra Las Alazanas	111	1710 - 2022	0.755	0.310	0.3994	0.6565	26.696
Sierra La Viga	90	1761 - 2022	0.736	0.259	0.1983	0.3708	19.117
Sierra La Marta	84	1821 - 2022	0.673	0.280	0.2331	0.4951	10.836
Sierra El Tarillal	90	1875 - 2022	0.793	0.367	0.2986	0.1976	25.784
Cronología Regional	375	1710 - 2022	0.669	0.301	0.2948	0.6134	

IC: Intercorrelación entre series, mide la señal común de las series involucradas; SM: Sensibilidad Media, expresa el cambio relativo en el crecimiento de un año con relación al siguiente (Fritts, 1976); D.E.: Desviación Estándar; AC: Autocorrelación de Primer Orden, grado de influencia que ejerce el año de crecimiento previo sobre el año de crecimiento actual; S/R: Relación señal-ruido, expresa la intensidad de la señal común observada entre las series de una cronología.

El éxito en el fechado de las muestras depende de las condiciones del sitio donde crecen los árboles y esto puede propiciar que el fechado de muestras varía de un 43 a un 90% (Villalba, 1990; Lara y Villalba, 1993; Neira, 1995).

Se halló una correlación altamente significativa entre series para cada uno de los cuatro diferentes sitios de trabajo (Cuadro 2), los valores mínimos de r fueron de 0.673 ($p < 0.01$) y máximos fueron de $r = 0.793$ ($p < 0.01$), citados valores que superan el mínimo significativo ($r = 0.3281$, $p < 0.01$) establecido por el programa de control de calidad COFECHA (Holmes, 1983).

Los valores de sensibilidad media (SM) oscilaron entre los más bajos de 0.259 y los más altos de 0.367, con base en estos resultados se reafirma que la especie posee un gran potencial dendrocronológico para la reconstrucción de variables climáticas. Para que una especie pueda considerarse con buen potencial dendrocronológico debe presentar alta intercorrelación entre series (en general para la mayoría de las cronologías los valores están entre 0.55 y 0.75), alta SM (un valor de 0.65 se presenta en especies muy sensibles y un valor de hasta 0.15 en especies poco sensibles), alta desviación estándar (generalmente los valores de este parámetro oscilan entre 0.3 a 0.8), alta relación señal ruido y baja autocorrelación de primer orden (valores de 0.3 a 0.5 se encuentran en especies con una alta sensibilidad) (Delgado, 2000; Constante *et al.*, 2010).

Aunque la serie más extensa alcanza poco más de tres siglos de longitud en este estudio, el mayor número de muestras cubre el período de 1900 a 2022. Del año más antiguo, 1710 al año 1800, se encontró la menor representatividad de muestras. Las series que no fueron posible extender hasta el presente (espacios de color gris) atribuible a problemas de crecimiento por la variabilidad climática regional y factores antropogénicos (Figura 2).

Correlación entre series

El análisis de correlación de Pearson entre series determinó que, las cuatro cronologías presentan una relación altamente significativa ($p < 0.01$) y todas las cronologías presentan una variabilidad anual muy parecida (Cuadro 3). Un análisis de componentes principales (ACP) valida lo anterior, ya que todas las cronologías presentan una misma variabilidad, puesto que se agrupan en el componente principal 1 (CP 1) que explicó el 72.14 % de la variabilidad (Figura 3). El componente principal 2 (PC 2) solo explicó el 13.08 % de la variabilidad. Con base en estos resultados, se integraron todas las cronologías en una sola regional para una parte de la subprovincia de la Gran Sierra Plegada de la SMOr.

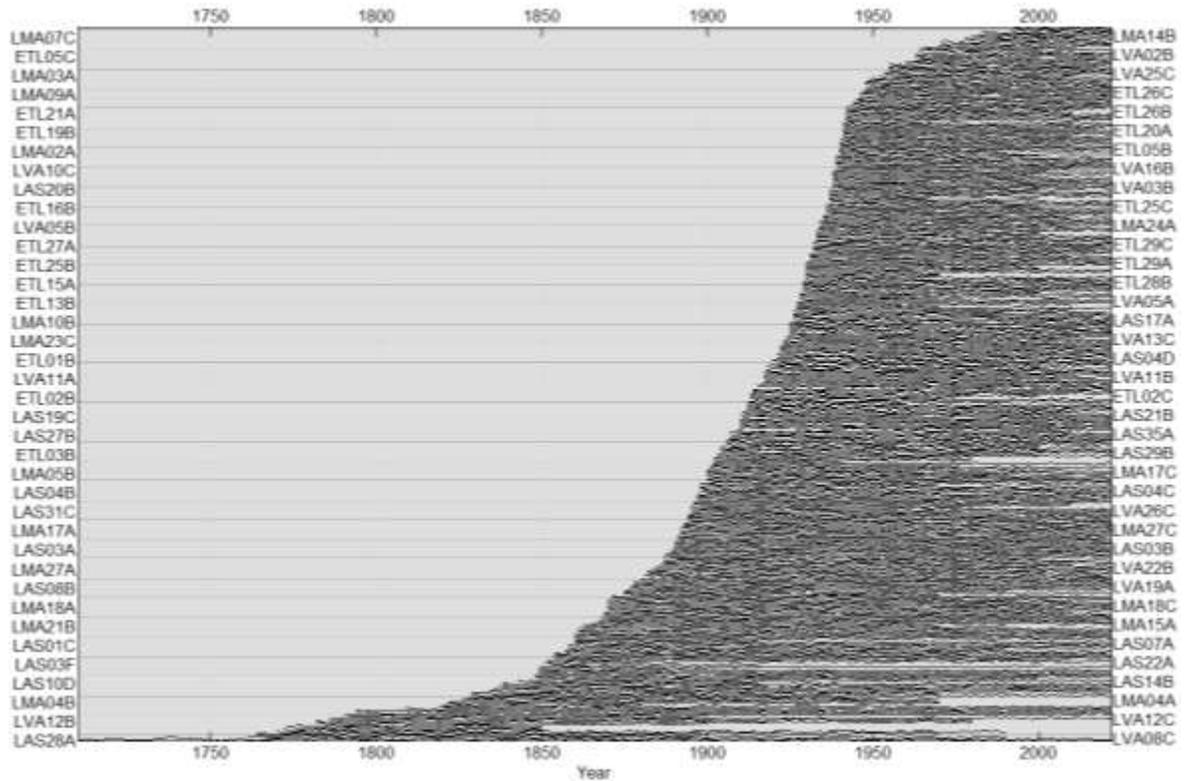


Figura 2. Longitud de cada una de las muestras y el tamaño de muestra que comprende cada uno los segmentos de la cronología regional o de cada muestra colectada de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

Cuadro 3. Matriz de correlación entre las cuatro diferentes cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco desarrolladas para la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

	LAS	LVA	LMA	ETL
LAS	-----	0.6211**	0.7022**	0.7338**
LVA	0.6211**	-----	0.5833**	0.4906**
LMA	0.7022**	0.5833**	-----	0.6270**
ETL	0.7338**	0.4906**	0.6270**	-----

Nota: ** $P < 0.01$; LAS: Sierra Las Alazanas; LVA: Sierra La Viga; LMA: Sierra La Marta; ETL: Sierra El Tarillal.

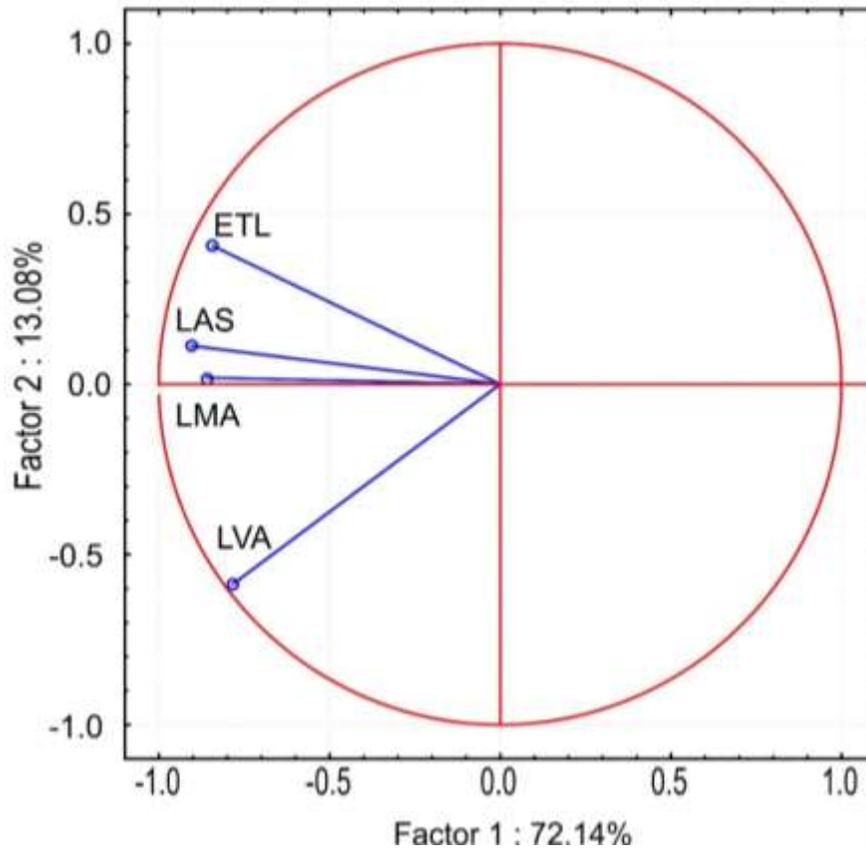


Figura 3. Análisis de componentes principales de las muestras de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental; LAS: Sierra Las Alazanas; LVA: Sierra La Viga; LMA: Sierra La Marta; ETL: Sierra El Tarillal.

Resultados similares se reportaron para una región de la SMOc, donde se determinó una variabilidad común entre cronologías de la misma especie separadas por kilómetros, pero en condiciones climáticas comunes (Cerano *et al.* 2012, Villanueva *et al.* 2015). Así mismo para la Sierra Plegada de la SMOc se reporta una respuesta común entre cronologías de diferentes especies, atribuible a una variabilidad climática de gran escala (Cerano *et al.* 2011b).

Cronología regional

Se logró desarrollar una cronología regional que comprende el período de 1710 a 2022 (313 años). La cronología muestra variabilidad de alta frecuencia (anual), por lo que se definieron periodos con buenas condiciones de humedad (por arriba del promedio) y períodos de importantes sequías (por debajo de media) para la región (Figura 4). La cronología presenta valores de correlación entre series altamente significativos ($r = 0.669$; $p < 0.01$) y una sensibilidad de 0.301.

Con respecto al tamaño de muestra, la cronología representó un número de muestras de mayor de 300 muestras de 1950 al 2022, en cambio la cronología tuvo como mínimo con 50 muestras, aproximadamente, hasta 1850. En el intervalo de tiempo de 1710 a 1849 ocurrió un menor número de muestras. El período final o más longevo de la cronología indica mayor variabilidad, lo anterior atribuible al tamaño de muestra (Figura 4).

El análisis señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés), define estadísticamente la repetición de muestras para cada segmento de la cronología, determinó que el período de la cronología que está representado por un adecuado tamaño de muestra fue el de 1780 a 2022 (Figura 4). Caso similar reportado por Wigley *et al.* (1984) donde la cronología regional registró un valor de EPS superior a 0.85 después de 1780, lo que generalmente se cita como un umbral aceptable para reconstrucciones dendroclimáticas. Un valor umbral aceptable de EPS es igual o mayor que 0.85 (Wigley *et al.*, 1984). Por lo tanto, la mayor extensión de la cronología está bien representada por el número de muestras para ser considerada en análisis climáticos.

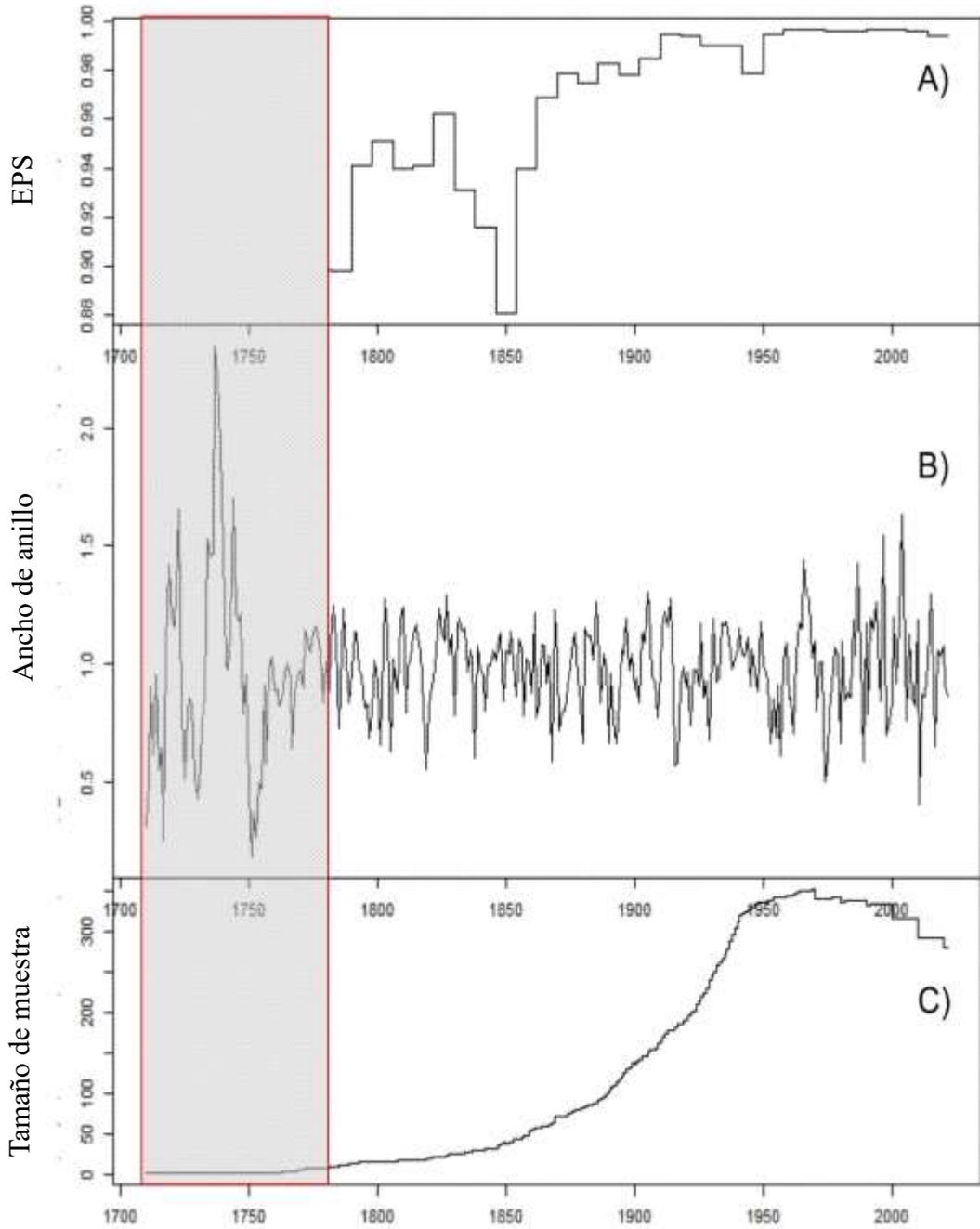


Figura 4. Análisis estadístico de EPS que indica estadísticamente el período de la cronología sustentado con un tamaño de muestra adecuado para fines de estudios de clima $EPS > 0.85$ (A). Cronología regional de ancho de anillo que muestra la variabilidad climática anual (B). Tamaño de muestra que indica la representatividad de la cronología por número de muestras (C); el área sombreada ya no indica la representatividad de la cronología por número de muestras.

Respuesta del crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco a las variables climáticas

La relación mensual entre las cronologías estándar, residual y arstan de anillo total, madera temprana y madera tardía con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV mostraron un comportamiento similar tanto para el anillo total como para la madera temprana, en contraste, la relación entre las cronologías citadas con la madera tardía fue diferente.

Ancho de anillo total y madera temprana

Las tres cronologías estándar, residual y arstan de anillo total y madera temprana reportaron una respuesta similar con la temperatura media, se hallaron correlaciones negativas para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio; y positivas para los meses julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (Figura 5 y 6). La más alta correlación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) se registró en el mes de marzo con la cronología arstan (Figura 5 y 6).

Con respecto a la temperatura mínima, las tres cronologías estándar, residual y arstan de anillo total y madera temprana, se hallaron correlaciones negativas en los meses de enero, abril, mayo, agosto, octubre y diciembre; y positivas para los meses febrero, marzo, junio, julio, septiembre y noviembre (Figura 5 y 6). Las más altas correlaciones negativas significativas ($p < 0.05$) se encontraron para los meses de enero y noviembre con la cronología arstan y positivas significativas ($p < 0.05$) de igual manera en los meses de enero y noviembre, pero con la cronología residual (Figura 5 y 6).

La temperatura máxima con las tres cronologías estándar, residual y arstan de anillo total y madera temprana se registraron correlaciones negativas en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio; y positivas para los meses agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La más alta correlación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) se halló en el mes de junio con la cronología residual (Figura 5 y 6).

La precipitación influyó en el crecimiento de las cronologías estándar y arstan tanto para anillo total como para la madera temprana, dado que se hallaron correlaciones negativas para

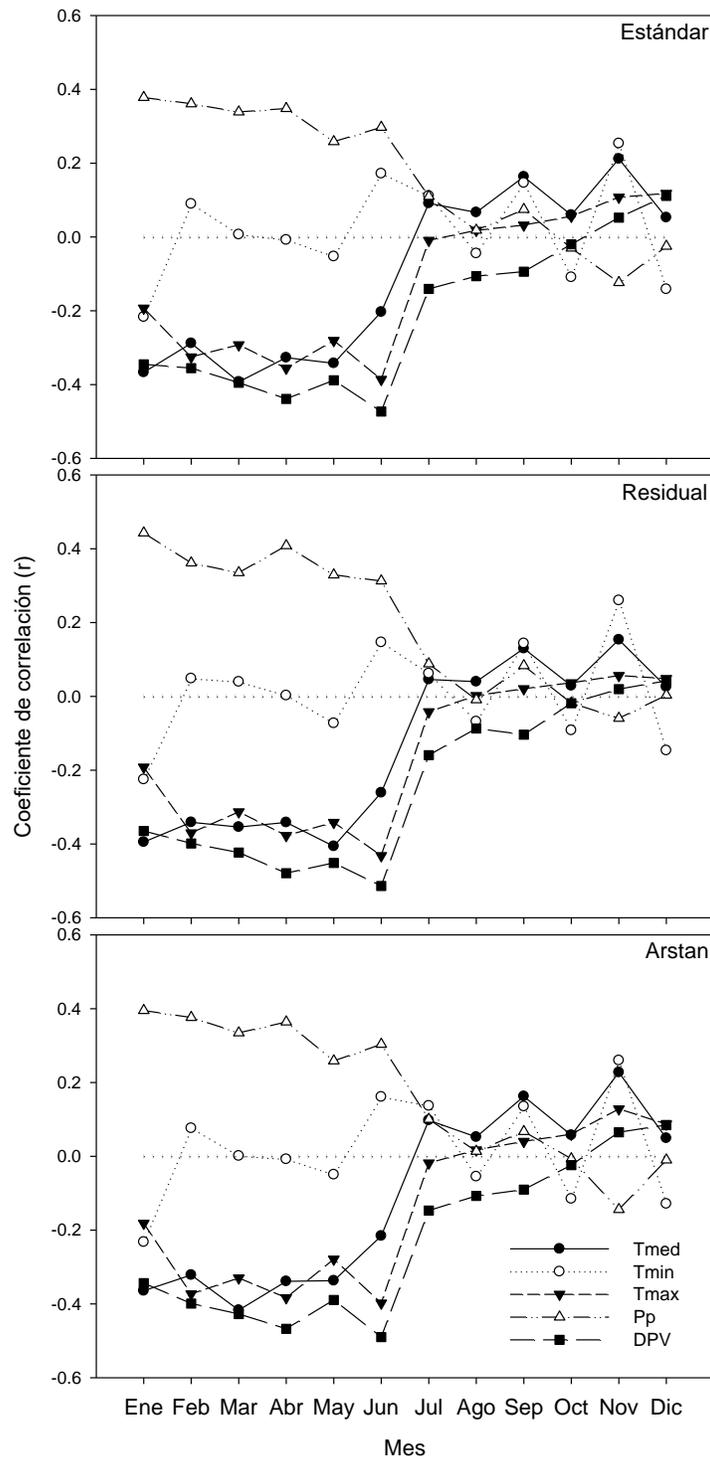


Figura 5. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice del anillo total en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

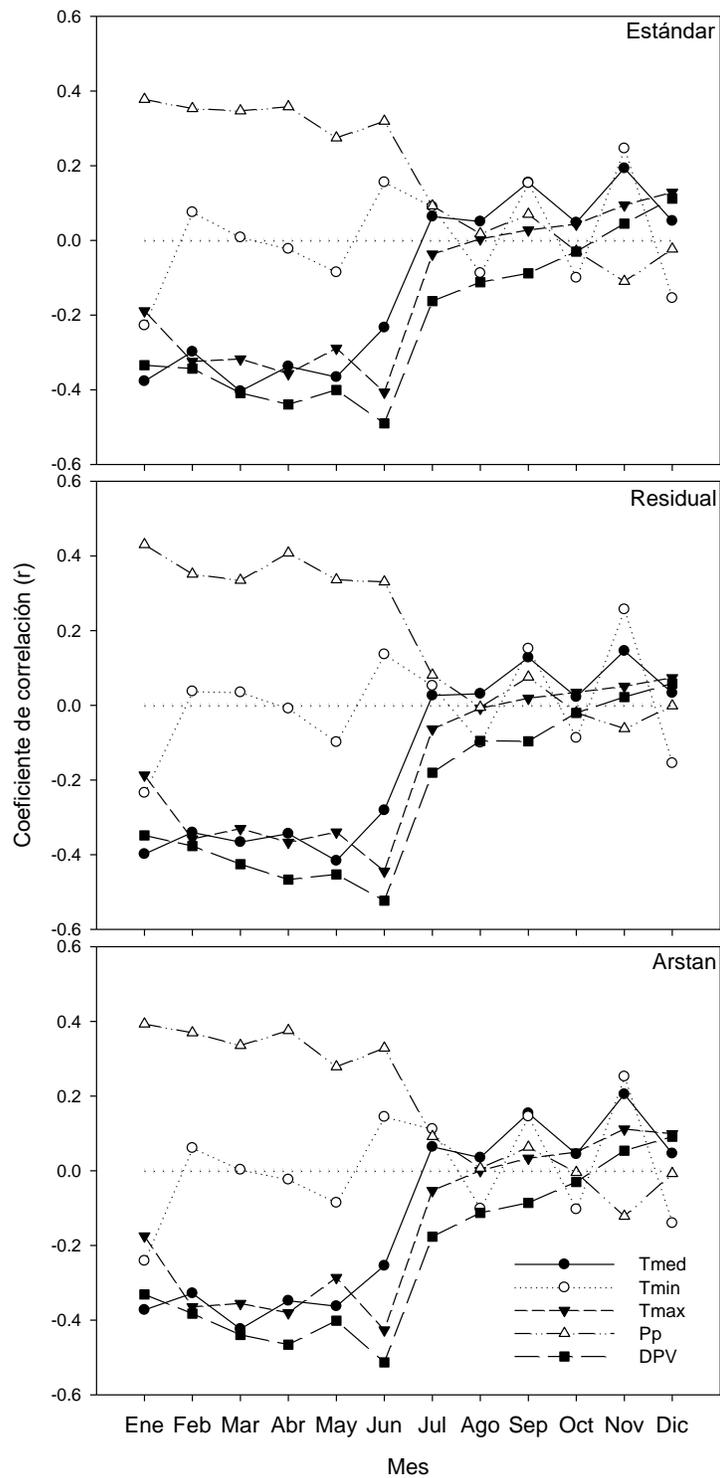


Figura 6. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera temprana en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

los meses de octubre, noviembre y diciembre; y positivas para los meses enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre (Figura 5 y 6). Por el contrario, la cronología residual tuvo una correlación negativa para el mes de agosto. La más alta correlación positiva y altamente significativa ($p < 0.01$) se encontró en el mes de enero con la cronología residual.

Finalmente, el DPV influyó para las tres cronologías estándar, residual y arstan con respecto al anillo total y madera temprana, debido a que se mostraron correlaciones negativas para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; y positivas para los meses noviembre y diciembre. Se determinó que la más alta correlación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) se registró para el mes de junio con la cronología residual (Figura 5 y 6).

Madera tardía

La relación mensual entre las cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y con el DPV determinó que la temperatura media influyó de manera similar en las cronologías estándar y arstan, ya que se reportaron correlaciones negativas para los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo; y positivas para los meses junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La cronología residual por otro lado, presentaron correlaciones negativas para los meses de junio y diciembre (Figura 7). Se determinó que la más alta correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) fue para el mes de marzo con la cronología estándar; así mismo se encontró una correlación positiva y altamente significativa ($p < 0.01$) para el mes de julio con la cronología arstan.

La temperatura mínima con las cronologías estándar y arstan de la madera tardía, registraron correlaciones negativas para los meses de enero, marzo, octubre y diciembre; y positivas para los meses febrero, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y noviembre. La cronología residual arrojó una correlación positiva para el mes de marzo. Se determinó que la más alta correlación positiva y significativa ($p < 0.05$) fue para el mes de junio con la cronología arstan (Figura 7).

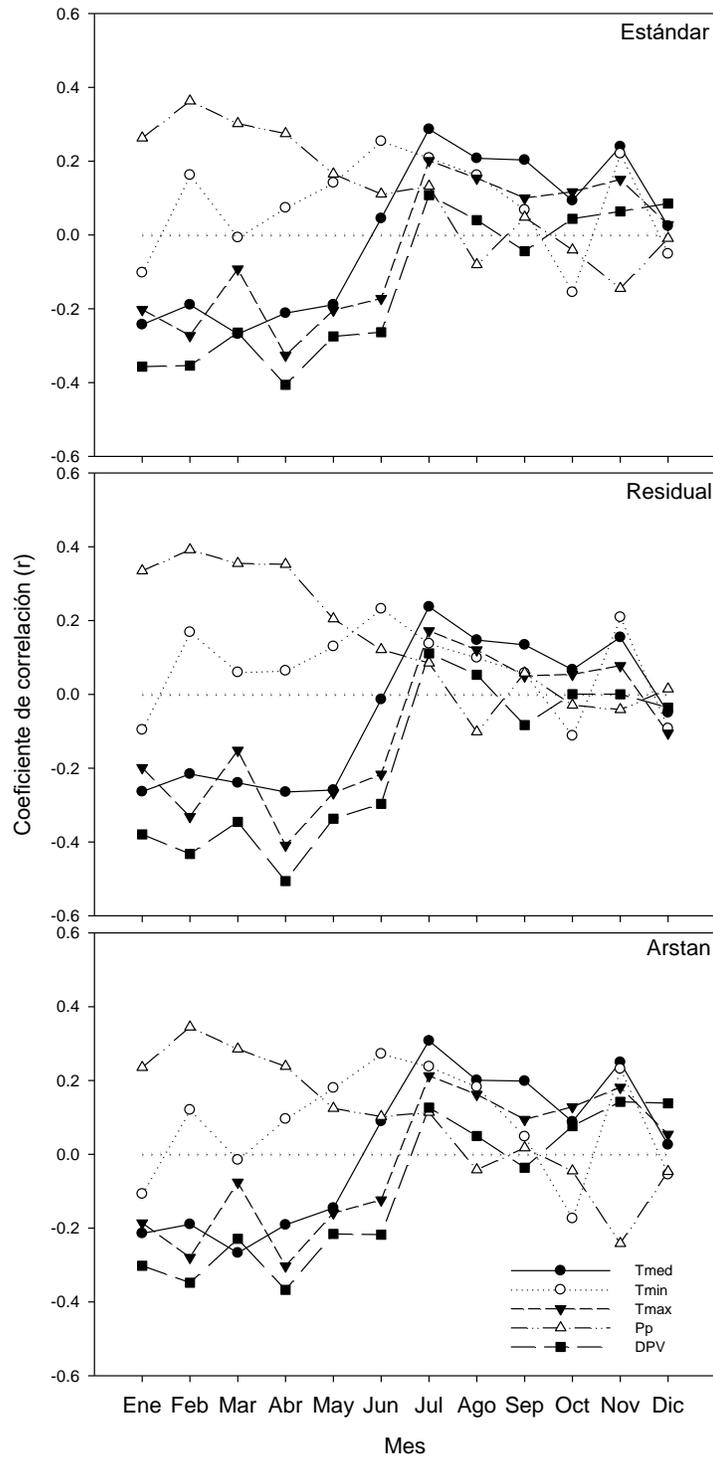


Figura 7. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera tardía en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

Con respecto a la temperatura máxima, las cronologías estándar y arstan de la madera tardía, registraron una respuesta similar, ya que se encontraron correlaciones negativas para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio; y positivas para los meses julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La cronología residual registró una correlación negativa para el mes de diciembre (Figura 7). Se halló que la más alta correlación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) se registró para el mes de abril con la cronología residual.

La precipitación y las tres cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía, mostraron correlaciones negativas para los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre; y correlaciones positivas para los meses enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y septiembre (Figura 7). Se determinó la más alta correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) para el mes de noviembre con la cronología arstan y positiva y altamente significativa ($p < 0.01$) para el mes de febrero con la cronología residual.

El DPV presentó respuestas similares para las tres cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía, registraron correlaciones negativas en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y septiembre; y positivas para los meses julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre (Figura 7). Se definió que la más alta correlación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) se registró para el mes de abril con la cronología residual.

Temperatura mínima

La correlación mensual entre la temperatura mínima con el anillo total y la madera temprana en este estudio fue positiva y significativa ($r = 0.2602$ y $r = 0.2567$, respectivamente) para el mes de noviembre con la cronología residual. Similarmente, la correlación entre la temperatura mínima y la madera tardía fue positiva y significativa ($r = 0.2723$) para el mes de junio con la cronología arstan (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura mínima mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.

Variable climática	Referencia	Especie	Lugar	Coefficiente de correlación (r)
Temperatura mínima	Huante <i>et al.</i> (1991)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	Michoacán	0.564*
	Cerano <i>et al.</i> (2014)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán	0.450**
	Chávez-Gándara <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus durangensis</i> Martínez	San Dimas, Durango	0.54**
	González (2019)	<i>Pinus cooperi</i> C.E Blanco	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	0.27**
		<i>Pinus lumholtzii</i> Rob. et Fern		
	Luna (2020)	<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	0.18**
	Este estudio (2024)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental	¹ 0.2602*, ² 0.2567* y ³ 0.2723*

Nota: ** P < 0.01; * P < 0.05. ¹anillo total; ²madera temprana; ³madera tardía.

Los valores de correlación mensual reportados en este estudio para la temperatura mínima con los índices de crecimiento de anillo total, así como con las maderas temprana y tardía fueron más bajos que los registrados por Huante *et al.* (1991) con *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham en Michoacán (r = 0.564) (Cuadro 4). De manera similar Chávez-Gándara *et al.* (2017) hallaron valores más altos con *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus cooperi* C.E Blanco y *Pinus lumholtzii* Rob. et Fern en San Dimas, Durango (r = 0.54) que los encontrados en este estudio. Así mismo Cerano *et al.* (2014) hallaron valores más altos de correlación con *A. religiosa* en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán (r = 0.450) con respecto a los valores registrados en este estudio.

González (2019) reportó una correlación similar a los valores registrados en este estudio con respecto a la temperatura mínima y los índices de crecimiento en *Pinus pseudostrobus* Lindl en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (r = 0.27) (Cuadro 4). En contraste, Luna

(2020) registró un valor de correlación más bajo con *P. teocote* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey ($r = 0.18$) que los encontrados en este estudio.

Con base a lo anterior es cierto que la temperatura mínima tiene un efecto positivo en el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía. Esto es debido a que las temperaturas mínimas propician a que los estomas estén abiertos por la disponibilidad de agua y a la menor evaporación, logrando que se mantenga la tasa de fotosíntesis.

Lo *et al.* (2010) en su estudio con *P. menziessii*, *Pinus contorta* Douglas ex Loudon y *Picea glauca* Moench realizado en Canadá, mencionan que la relación positiva entre la temperatura mínima y el crecimiento anual se debe a la disponibilidad de agua, que contribuye a extender la estación de crecimiento; por consiguiente, el árbol genera más biomasa y por tanto mayor crecimiento.

También la respuesta del crecimiento a las temperaturas mínimas se atribuye, principalmente, a que las temperaturas bajas propician una menor evaporación tanto del suelo como de las plantas, lo cual se traduce en agua disponible para emplearse al inicio de la estación de crecimiento (Cerano *et al.*, 2011b; Chávez-Gándara *et al.*, 2017).

La temperatura es uno de los principales factores ambientales que determinan el tipo de adaptación que requiere la planta para que la tasa de fotosíntesis se mantenga (Chaar, 2013), es así como algunas especies de *Pinus* reducen drásticamente su tasa fotosintética a temperaturas inferiores a 10 °C, deteniéndose totalmente a temperaturas cercanas a 5 °C (Day *et al.*, 1991; Taiz y Zeiger, 1991). Temperaturas cercanas a 5 °C o por debajo de ésta, propician que las estomas se cierren interrumpiendo el intercambio de gases (Barceló *et al.*, 2001).

Un intervalo óptimo para la fotosíntesis de algunas coníferas se encuentra entre 15 y 25 °C, la cual disminuye gradualmente a ambos extremos (Huxman *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2013; McCullough *et al.*, 2017).

Temperatura máxima

La correlación mensual encontrada entre la temperatura máxima con el anillo total y la madera temprana en el presente estudio fue negativa ($r = -0.4318$ y $r = -0.4445$; respectivamente) y en ambos casos fue altamente significativa para el mes de junio con la cronología residual. Así mismo la correlación entre la temperatura máxima y la madera tardía fue, también, negativa ($r = -0.4091$) y altamente significativa para el mes de abril con la cronología residual (Cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura máxima mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.

Variable climática	Referencia	Especie	Lugar	Coefficiente de correlación (r)
Temperatura máxima	Huante <i>et al.</i> (1991)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltl. et Cham	Michoacán	-0.719 **
	Cerano <i>et al.</i> (2014)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltl. et Cham	Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán	-0.378**
	Chávez-Gándara <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus durangensis</i> Martínez	San Dimas, Durango	-0.48*
		<i>Pinus cooperi</i> C.E Blanco		
		<i>Pinus lumholtzii</i> Rob. et Fern		
	González (2019)	<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	-0.22**
	Luna (2020)	<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltl	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	-0.20**
	Este estudio (2024)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental	¹ -0.4318**, ² -0.4445** y ³ -0.4091**

Nota: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$. ¹anillo total; ²madera temprana; ³madera tardía.

Los valores de correlación mensual registrados en este estudio para la temperatura máxima con los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía fueron más bajos que los registrados por Huante *et al.* (1991) ($r = -0.719$) (Cuadro 5). Chávez-Gándara

et al. (2017) ($r = -0.48$) encontraron una correlación similar a los valores hallados en este estudio. En contraste, Cerano *et al.* (2014) ($r = -0.378$); González (2019) ($r = -0.22$) y Luna (2020) ($r = -0.20$) registraron un valor de correlación más bajo que los encontrados en este estudio.

De acuerdo a lo anterior es notorio que la temperatura máxima tiene un efecto negativo en el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía. Esto es debido a que las temperaturas máximas ejercen una presión de vapor de agua, provocando que la tasa de fotosíntesis sea casi nula.

La mayoría de las coníferas muestran correlaciones negativas entre la cronología y la temperatura máxima, es decir, que las temperaturas máximas tienen un efecto negativo en el crecimiento, a medida que incrementan las temperaturas el crecimiento disminuye (Marlés *et al.*, 2015; Gutiérrez-García y Ricker, 2019).

Esto generalmente se atribuye a que temperaturas mayores de 25 °C ejercen una presión de vapor de agua a nivel estomático de 2.0 kPa, y de esta manera provocar una disminución en la apertura del estoma, de manera que conforme aumenta la temperatura, aumenta el DPV hasta alcanzar los 3.0 kPa a 30 °C, lo cual provoca que la fotosíntesis sea prácticamente nula, y con ello el intercambio de gases de la atmósfera y la hoja no se lleve a cabo (Leverenz, 1981), además esto disminuye la producción de carbohidratos disponibles utilizados para el crecimiento (Kozlowski y Pallardy, 2002).

Precipitación

La correlación mensual entre la precipitación con el anillo total y la madera temprana en este estudio fue positiva y altamente significativa ($r = 0.4426$ y $r = 0.4301$, respectivamente) para el mes de enero con la cronología residual. Así mismo se hallaron valores para la madera tardía ($r = 0.3916$) en el mes de febrero con la cronología residual (Cuadro 6).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación (r) entre la precipitación mensual y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.

Variable climática	Referencia	Especie	Lugar	Coefficiente de correlación (r)
Precipitación	Huante <i>et al.</i> (1991)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	Michoacán	0.659*
	Gutiérrez (2014)	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede Ex Schetol	Los Tuxtlas, Veracruz	0.46**
	Chávez-Gándara <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus durangensis</i> Martínez <i>Pinus cooperi</i> C.E Blanco <i>Pinus lumholtzii</i> Rob. et Fern	San Dimas, Durango	0.57**
	González <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus lumholtzii</i> B.L. Rob. et Fernald	Sur del estado de Durango	0.56**
	Aquino-Ramírez <i>et al.</i> (2019)	<i>Abies guatemalensis</i> Rehder	Ixtlán de Juárez, Oaxaca	0.66**
	Luna (2020)	<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	0.57**
	Este estudio (2024)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental	¹ 0.4426**, ² 0.4301** y ³ 0.3916**

Nota: ** P < 0.01; * P < 0.05. ¹anillo total; ²madera temprana; ³madera tardía.

Los valores de correlación mensual hallados en este estudio para la precipitación con los índices de crecimiento de anillo total, así como con las maderas temprana y tardía fueron más bajos que los reportados por Aquino-Ramírez *et al.* (2019) con *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca (r = 0.66) y Huante *et al.* (1991) con *A. religiosa* (r = 0.659). Así mismo Chávez-Gándara *et al.* (2017) y Luna (2020) registraron valores más altos de correlación (r = 0.57) con respecto a los encontrados en este estudio. De manera similar González *et al.* (2017) con *P. lumholtzii* al Sur del estado de Durango (r = 0.56) hallaron valores más altos que los registrados en este estudio (Cuadro 6).

Gutiérrez (2014) reportó una correlación similar a los valores encontrados en este estudio con respecto a la precipitación y los índices de crecimiento con *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en Los Tuxtlas, Veracruz (r = 0.46) (Cuadro 6).

Con base a lo anterior es indiscutible que la precipitación tiene un efecto positivo en el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía. Esto es debido a que la disponibilidad de agua es el principal elemento crucial para el crecimiento.

En el caso específico de los bosques de coníferas en México, diversos estudios señalan al agua como el principal factor que limita el crecimiento radial de los árboles en el norte, centro y sur del país (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Villanueva-Díaz *et al.*, 2009; West, 2011; Amaro-Sánchez, 2012; Allende *et al.*, 2016).

La diferencia de la respuesta a la precipitación entre especies del norte, centro y sur de México, se atribuye en parte al adelanto de las lluvias en el sur de México, que se da a causa del Sistema de Monzones de América del Norte (NAMS, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por lluvias intensas a partir desde mediados de mayo a lo largo de la costa occidental de México, y así avanzan hacia el suroeste de Estados Unidos hasta los meses de julio y agosto (Therrell *et al.*, 2002).

La importancia de la humedad en los bosques de coníferas es indiscutible, ya que los árboles en múltiples localidades del país no producen anillos de crecimiento en años extremadamente secos (NOAA, 2006; Gutiérrez, 2017).

Respuesta del crecimiento a períodos acumulados o estacionales

Ancho de anillo total y madera temprana

Al igual que la respuesta del crecimiento a variables climáticas en intervalos mensuales, las cronologías de anillo total como las de madera temprana responden de manera similar a períodos acumulados o estacionales. Se encontró que, las tres cronologías estándar, residual y arstan tanto de anillo total como de madera temprana, presentaron correlaciones negativas con la temperatura media de enero-diciembre (Figura 8). Se encontró que la correlación más alta negativa y altamente significativa ($r = -0.5999$; $p < 0.01$) ocurrió para el período enero-junio con la cronología residual de madera temprana (Cuadro 7).

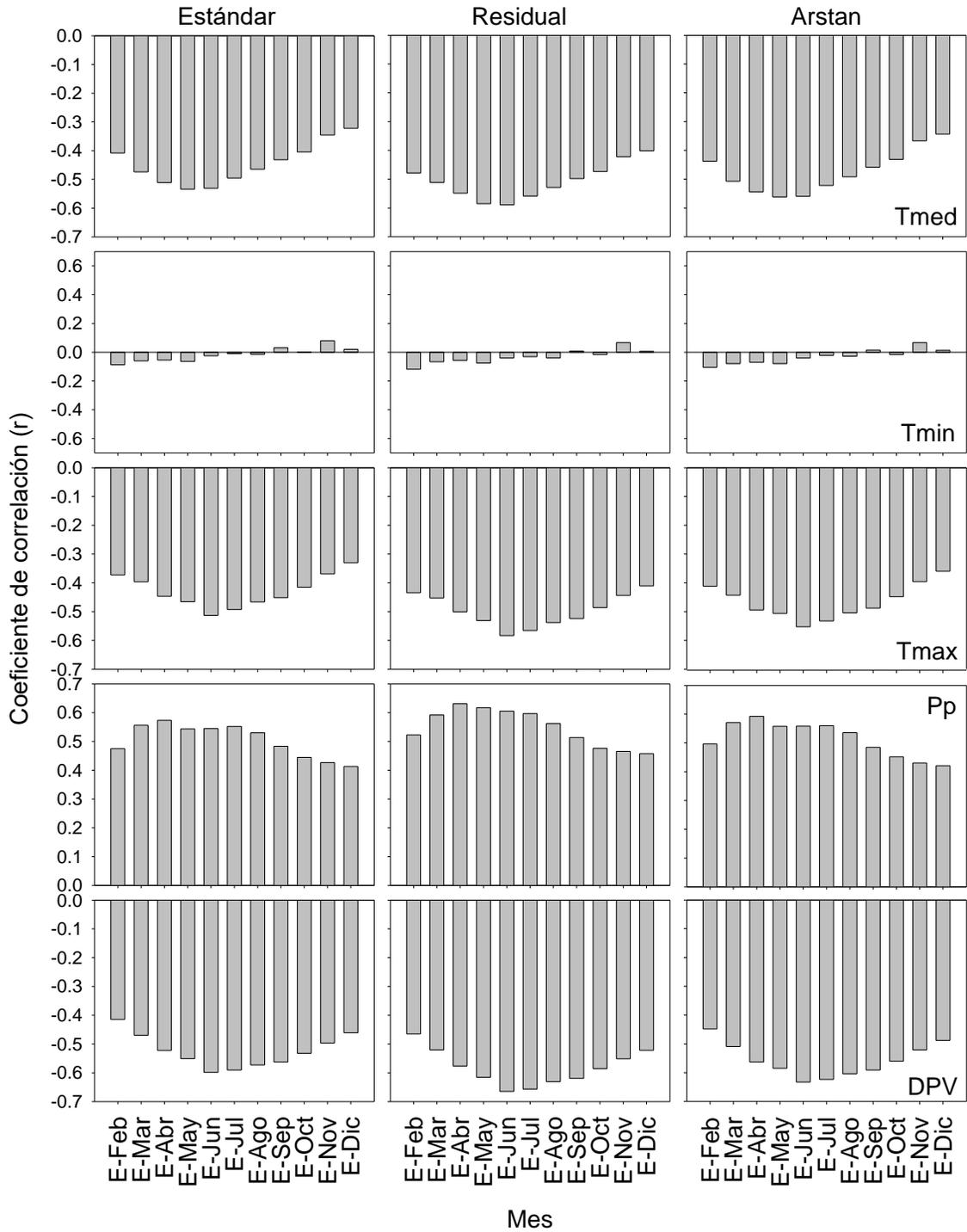


Figura 8. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice del anillo total en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

Cuadro 7. Modelos de regresión que explican la mayor variabilidad y correlación entre los índices de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y las variables climáticas en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

Variable climática	Modelo	Beta	R	R ²
Temperatura media	Intercepto	13.8802	0.5892**	0.3471
	Anillo total-Cronología Residual	-1.902		
	Intercepto	13.7048	0.5999**	0.3599
	Madera temprana-Cronología Residual	-1.7272		
	Intercepto	13.5608	0.3717**	0.1381
Madera tardía-Cronología Residual	-2.3923			
Temperatura mínima	Intercepto	-1.4412	0.1183	0.014
	Anillo total-Cronología Residual	-0.7267		
	Intercepto	-1.4456	0.1323	0.0175
	Madera temprana-Cronología Residual	-0.7246		
	Intercepto	2.958	0.2026	0.041
Madera tardía-Cronología Arstan	0.989			
Temperatura máxima	Intercepto	25.5315	0.5834**	0.3403
	Anillo total-Cronología Residual	-2.5589		
	Intercepto	25.2466	0.5811**	0.3377
	Madera temprana-Cronología Residual	-2.2732		
	Intercepto	26.3544	0.4366**	0.1906
Madera tardía-Cronología Residual	-3.4356			
Precipitación	Intercepto	10.0034	0.631**	0.3981
	Anillo total-Cronología Residual	209.525		
	Intercepto	35.0933	0.6224**	0.3873
	Madera temprana-Cronología Residual	184.3217		
	Intercepto	-116.1261	0.5747**	0.3302
Madera tardía-Cronología Residual	342.3248			
Déficit de Presión de Vapor	Intercepto	1.2837	0.6649**	0.4421
	Anillo total-Cronología Residual	-0.3597		
	Intercepto	1.2402	0.6549**	0.4288
	Madera temprana-Cronología Residual	-0.316		
	Intercepto	1.4704	0.5737**	0.3291
Madera tardía-Cronología Residual	-0.5567			

Negritas: mejor modelo para reconstrucción; R: Coeficiente de correlación; R²: Coeficiente de determinación.

Para la temperatura mínima, se registraron correlaciones similares para las tres cronologías estándar, residual y arstan del anillo total y de la madera temprana, correlaciones negativas para los meses acumulados de enero-agosto y enero-octubre; y positivas para los meses acumulados enero-septiembre, enero-noviembre y enero-diciembre, ningún período fue significativo.

Con respecto a la temperatura máxima, para las tres cronologías estándar, residual y arstan del anillo total y de la madera temprana, se hallaron correlaciones negativas en todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 8 y 9). Se halló que la correlación más alta negativa y altamente significativa ($r = -0.5834$; $p < 0.01$) ocurrió en el período enero-junio con la cronología residual de anillo total (Cuadro 7).

Para la precipitación, se encontró una respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan del anillo total y de la madera temprana, correlaciones positivas para el período acumulados de enero-diciembre (Figura 8 y 9). El análisis de correlación arrojó que la correlación más alta positiva y altamente significativa ($r = 0.6310$; $p < 0.01$) se registró para el período enero-abril con la cronología residual de anillo total (Cuadro 7).

El DPV presentó una respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan de anillo total y madera temprana, ya que se encontraron correlaciones negativas para todo el período acumulado de enero-diciembre (Figura 8 y 9). Por lo que se encontró la correlación más alta negativa y altamente significativa ($r = -0.6649$; $p < 0.01$) para el período que comprende los meses de enero-junio con la cronología residual de anillo total (Cuadro 7).

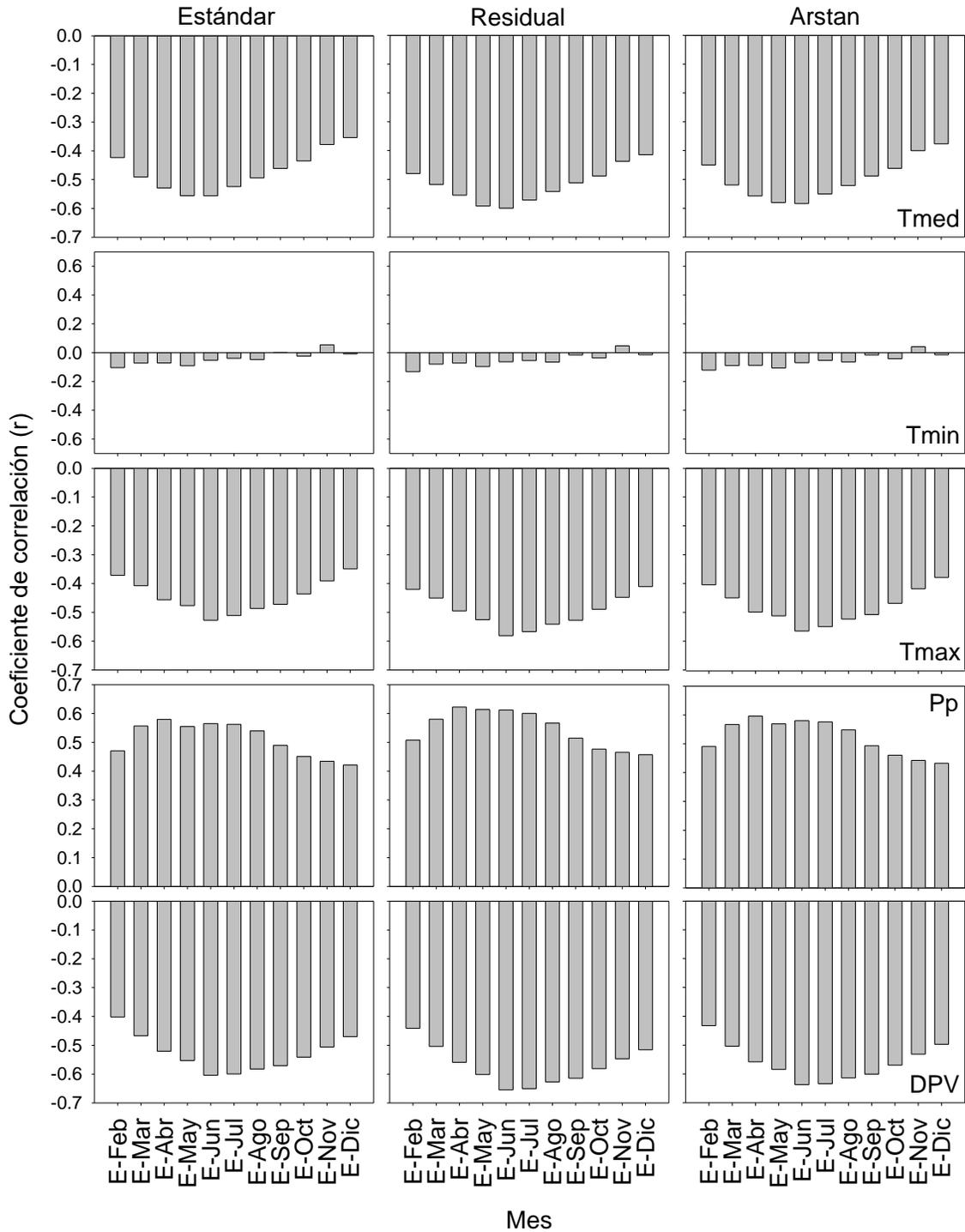


Figura 9. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera temprana en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

Madera tardía

Con respecto a la madera tardía, se encontró que la temperatura media registró una respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan, ya que el análisis de correlación arrojó correlaciones negativas en todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 10). Así mismo la correlación más alta negativa y altamente significativa ($r = -0.3717$; $p < 0.01$) correspondió al período enero-mayo con la cronología residual de la madera tardía (Cuadro 7).

Para la temperatura mínima, se halló una respuesta similar para las dos cronologías estándar y residual de la madera tardía, y se encontraron correlaciones positivas no significativas para todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 10). En contraste, en la cronología arstan muestra una correlación negativa para el periodo de enero-marzo (Cuadro 7).

Así mismo la temperatura máxima para las tres cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía, se hallaron correlaciones negativas para todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 10). Se encontró que la correlación más alta negativa y altamente significativa ($r = -0.4366$; $p < 0.01$) correspondió al período enero-junio con la cronología residual de la madera tardía (Cuadro 7).

Con respecto a la precipitación mostró una respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía, correlaciones positivas para todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 10). Se halló la correlación más alta positiva y altamente significativa ($r = -0.5747$; $p < 0.01$) para enero-abril con la cronología residual (Cuadro 7).

El DPV se encontró respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan de la madera tardía, correlaciones negativas en todos los meses acumulados de enero-diciembre (Figura 10). Se encontró una correlación negativa y altamente significativa ($r = -0.5737$; $p < 0.01$) en el período enero-junio con la cronología residual (Cuadro 7).

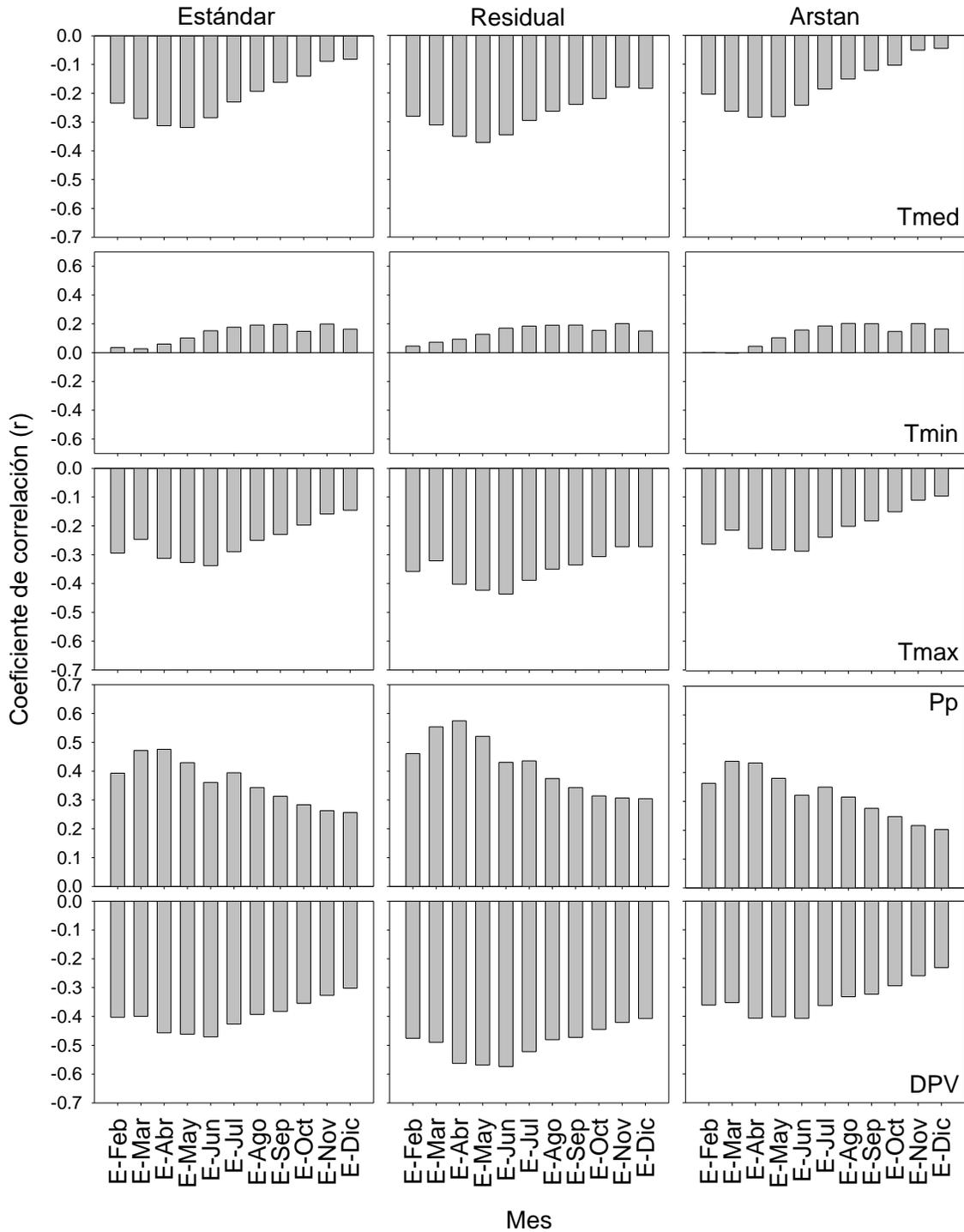


Figura 10. Coeficientes de correlación (r) de manera mensual acumulada entre las temperaturas media, mínima, máxima, la precipitación y el déficit de presión de vapor con el índice de la madera tardía en las tres cronologías estándar, residual y arstan.

Temperatura máxima acumulada

La correlación mensual acumulada entre la temperatura máxima acumulada con el índice de crecimiento del anillo total, la madera temprana y la madera tardía en el presente estudio fue negativa y altamente significativa ($r = -0.5834$, $r = -0.5811$ y $r = -0.4366$, respectivamente) en el periodo de enero-junio con la cronología residual (Cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación (r) entre la temperatura máxima mensual acumulada y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.

Variable climática	Referencia	Especie	Lugar	Coefficiente de correlación (r)
Temperatura máxima acumulada	Villanueva-Díaz <i>et al.</i> (2018)	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede Ex Schetol	Bosque La Primavera, Jalisco	-0.622**
	Aquino-Ramírez <i>et al.</i> (2019)	<i>Abies guatemalensis</i> Rehder	Ixtlán de Juárez, Oaxaca	-0.42**
	Gutiérrez-García y Ricker (2019)	<i>Abies vejarii</i> Martínez	Sierra de San Antonio Peña Nevada, Nuevo León	-0.62
		<i>Pinus hartwegii</i> Lindl		-0.62
		<i>Pinus strobiformis</i> Englem		-0.56
		<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltl		-0.49
		Este estudio (2024)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental

Nota: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$. ¹anillo total; ²madera temprana; ³madera tardía.

Los valores de correlación reportados en este estudio para la temperatura máxima acumulada con los índices de crecimiento fueron más bajos que los hallados por Villanueva-Díaz *et al.* (2018) con *P. oocarpa* en el Bosque La Primavera, Jalisco ($r = -0.622$) (Cuadro 8). De manera similar Gutiérrez-García y Ricker (2019) reportaron valores más altos con *A. vejarii* y *Pinus hartwegii* Lindl, en la Sierra de San Antonio Peña Nevada, Nuevo León ($r = -0.62$ y $r = -0.62$, respectivamente) que los encontrados en este estudio.

Otros autores hallaron una correlación mensual acumulada similar a los valores registrados en este estudio con respecto a la temperatura máxima acumulada y los índices de crecimiento como el caso de Gutiérrez-García y Ricker (2019) con *Pinus strobiformis* Englem y *P. teocote* ($r = -0.56$ y $r = -0.49$, respectivamente) y Aquino-Ramírez *et al.* (2019) con *A. guatemalensis* ($r = -0.42$) (Cuadro 8).

De acuerdo a lo anterior es cierto que la temperatura máxima acumulada tiene un efecto negativo en el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía. Esto es debido a que las temperaturas máximas ejercen una presión de vapor de agua, provocando que la tasa de fotosíntesis sea casi nula.

Precipitación acumulada

La correlación mensual acumulada entre la precipitación acumulada con el índice de crecimiento del anillo total, la madera temprana y la madera tardía en el presente estudio fue positiva y altamente significativa ($r = 0.6310$, $r = 0.6224$ y $r = 0.5747$, respectivamente) en el periodo de enero-abril (invierno primavera) con la cronología residual (Cuadro 9).

Los valores de correlación reportados en este estudio para la precipitación acumulada con los índices de crecimiento de anillo total, así como con las maderas temprana y tardía fueron más bajos que los reportados con la misma especie por Cerano *et al.* (2012) en la Cuenca del río Nazas, Durango ($r = 0.80$); Cerano *et al.* (2011b) al Sureste de Coahuila ($r = 0.77$) y Cerano *et al.* (2009) al Suroeste de Chihuahua ($r = 0.74$) (Cuadro 9).

Así mismo otros autores con diferentes especies hallaron correlaciones para la precipitación acumulada con los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía tal es el caso de Constante *et al.* (2009) con *Pinus cembroides* Zucc. al Sureste de Coahuila ($r = 0.90$); Cerano *et al.* (2014) con *A. religiosa* ($r = 0.81$); Villanueva-Díaz *et al.* (2018) con *P. oocarpa* ($r = 0.775$); González *et al.* (2017) en *P. lumholtzii* ($r = 0.76$); Chávez-Gándara *et al.* (2017) con *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. lumholtzii* ($r = 0.73$); Díaz-Ramírez *et al.* (2016) con *P. durangensis* en Pueblo Nuevo, Durango ($r = 0.72$); Cardoza *et al.* (2014) con *P. cembroides* en Altzayanca, Tlaxcala ($r = 0.71$) y López-Hernández *et al.* (2018) con *P. oocarpa* en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas ($r = 0.71$), valores más altos de correlación a los encontrados en este estudio (Cuadro 9).

Aquino-Ramírez *et al.* (2019) reportaron una correlación similar a los valores registrados en este estudio con respecto a la precipitación acumulada y los índices de crecimiento ($r = 0.67$), de manera análoga lo hallaron Cortés-Cortés *et al.* (2021) con *P. montezumae* en Coyuca de Catalán, Guerrero ($r = 0.66$) y González (2019) ($r = 0.52$) (Cuadro 9). En contraste, Luna (2020) reportó un valor de correlación más bajo ($r = 0.46$) que los encontrados en este estudio.

Con base a lo anterior es cierto que la precipitación acumulada tiene un efecto positivo en el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía. Esto es debido a que la disponibilidad de agua es el principal elemento crucial para el crecimiento.

Cuadro 9. Coeficientes de correlación (r) entre la precipitación mensual acumulada y los índices de crecimiento de anillo total, madera temprana y madera tardía reportados para diversas especies y localidades en México.

Variable climática	Referencia	Especie	Lugar	Coefficiente de correlación (r)
Precipitación acumulada	Cerano <i>et al.</i> (2009)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Suroeste de Chihuahua	0.74*
	Constante <i>et al.</i> (2009)	<i>Pinus cembroides</i> Zucc.	Sureste de Coahuila	0.90**
	Cerano <i>et al.</i> (2011b)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sureste de Coahuila	0.77**
	Cerano <i>et al.</i> (2012)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Cuenca del rio Nazas, Durango	0.80**
	Cardoza <i>et al.</i> (2014)	<i>Pinus cembroides</i> Zucc.	Altzayanca, Tlaxcala	0.71**
	Cerano <i>et al.</i> (2014)	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham	Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán	0.81**
	Díaz-Ramírez <i>et al.</i> (2016)	<i>Pinus durangensis</i> Martínez	Pueblo Nuevo, Durango	0.72**
	Chávez-Gándara <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus durangensis</i> Martínez <i>Pinus cooperi</i> C.E Blanco <i>Pinus lumholtzii</i> Rob. et Fern	San Dimas, Durango	0.73**
	González <i>et al.</i> (2017)	<i>Pinus lumholtzii</i> B.L. Rob. et Fernald	Sur del estado de Durango	0.76**
	López-Hernández <i>et al.</i> (2018)	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede Ex Schetol	Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas	0.71*
	Villanueva-Díaz <i>et al.</i> (2018)	<i>Pinus oocarpa</i> Schiede Ex Schetol	Bosque La Primavera, Jalisco	0.775**
	Aquino-Ramírez <i>et al.</i> (2019)	<i>Abies guatemalensis</i> Rehder	Ixtlán de Juárez, Oaxaca	0.67**
	González (2019)	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	0.52**
	Gutiérrez-García y Ricker (2019)	<i>Abies vejarii</i> Martínez <i>Pinus hartwegii</i> Lindl <i>Pinus strobiformis</i> Englem <i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltld	Sierra de San Antonio Peña Nevada, Nuevo León	0.64 0.84 0.70
	Luna (2020)	<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltld	Parque Nacional Cumbres de Monterrey	0.46**
	Cortés-Cortés <i>et al.</i> (2021)	<i>Pinus montezumae</i> Lamb	Coyuca de Catalán, Guerrero	0.66**
	Este estudio (2024)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Sierra Plegada de la Sierra Madre Oriental	¹ 0.6310**, ² 0.6224** y ³ 0.5747**

Nota: ** P < 0.01; * P < 0.05. ¹anillo total; ²madera temprana; ³madera tardía.

Déficit de Presión de Vapor

La correlación entre los índices de crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía de *P. menziesii* con el DPV mostró que esta variable influye de manera importante en su crecimiento. Los valores altos del DPV se relacionaron con índices de crecimiento bajos. Durante los últimos 70 años se determinaron tres años con valores de crecimiento mínimo 1955, 1998 y 2011, que están relacionados con los valores de DPV muy altos 1.92, 1.98 y 1.75 kPa, respectivamente (Figura 11). El año 1998 registró el DPV más alto en los últimos 70 años y el cual alcanzó valores cercanos a los 2.0 kPa.

La temperatura juega un papel importante en los procesos fisiológicos, ya que un incremento en la temperatura puede originar una disminución en la producción de carbohidratos, cuando los árboles en condiciones de alta evapotranspiración capturan menos CO₂, cierran sus estomas, para evitar la pérdida de agua (Pallardy, 2010).

A medida que aumenta la temperatura aumenta el DPV en las acículas, a una temperatura de 25 °C el DPV alcanza los 2.0 KPa y sigue en aumento con el incremento de la temperatura, al aumentar estos parámetros, se reduce la conductancia estomática (salida de agua y entrada de CO₂ de los estomas) y la tasa de fotosíntesis neta es nula a partir de los 30 °C y 3.0 KPa de DPV (Leverenz, 1981; Meinzer, 1982), y al haber poca humedad en el aire debido a las altas temperaturas y las bajas precipitaciones, el árbol cierra los estomas para evitar la pérdida de agua por transpiración (Barceló *et al.*, 2001).

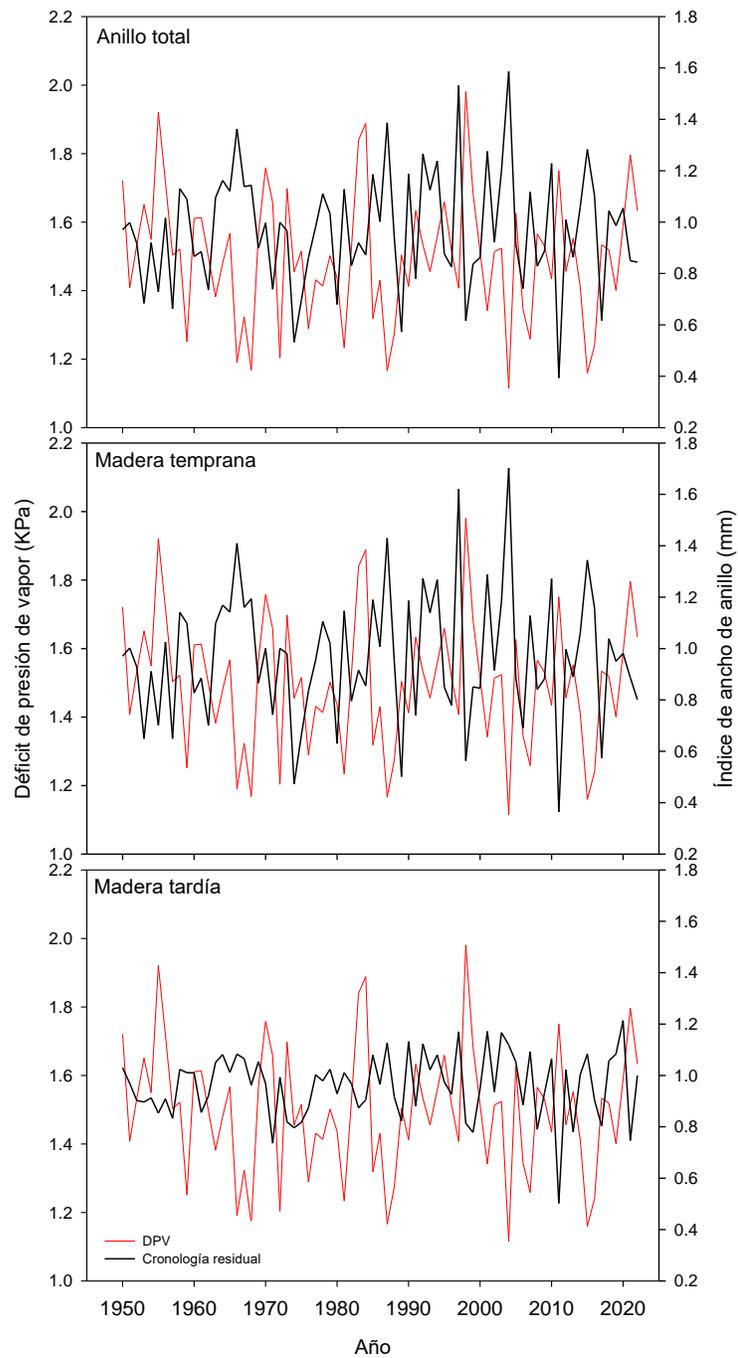


Figura 11. Relación del déficit de presión de vapor con el anillo total, madera temprana y madera tardía con su cronología residual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, Sierra Madre Oriental.

V. CONCLUSIONES

Se determinaron correlaciones entre el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *P. menziesii* con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, SMOr.

Se rechaza la hipótesis nula por lo tanto si existe correlación entre el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *P. menziesii* con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV en cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, SMOr.

Se confirma la relación que existe entre el crecimiento del anillo total, la madera temprana y la madera tardía con las temperaturas media, mínima y máxima, así como con la precipitación y el DPV.

La correlación entre el crecimiento del anillo total, la madera temprana y la madera tardía de *P. menziesii* con el DPV y con las temperaturas media y máxima fue negativa y altamente significativa. En contraste, la correlación entre estos índices de crecimiento con la temperatura mínima y con la precipitación fue positiva, para cuatro localidades en la subprovincia de la Gran Sierra Plegada, SMOr.

Este trabajo generó conocimiento sobre la influencia de variables climáticas en el crecimiento de *P. menziesii*, y representa un primer acercamiento sobre el análisis de la influencia del DPV en dicho crecimiento. Es el primer trabajo que reporta la relación DPV-crecimiento para esta especie en México.

Por otro lado, se corrobora el potencial de esta especie para poder reconstruir series paleoclimáticas, no solo de lluvia invierno-primavera, sino también con variables como las temperaturas media, mínima y máxima, de las cuales son exiguas las reconstrucciones en México.

VI. LITERATURA CITADA

- Allen, C. D., Breshears, D. D., and 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), 1-55. DOI:10.1890/ES15-00203.1.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (2006). Crop evapotranspiration: guidelines for determining crop water requirements. Roma, FAO, 298(0).
- Allende, T. C., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J., and Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116.
- Amaro-Sánchez, A. (2012). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera en base a *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco (Tesis). División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Saltillo, Coahuila, México.
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., y Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25(2). DOI:10.21829/myb.2019.2521773.
- Arreola-Ortiz, M. R., González-Elizondo, M., y Návar-Cháidez, J. de J. (2010). Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. *Madera y Bosques*, 16(1), 71-84.
- Aussenac, G. (1975). Étude de la croissance en hauteur chez quelques résineux, effect de la température. *Annales des Sciences Forestieres*, 32(1), 1-16.
- Barceló, J. B., Nicolás, G., Sabater, B., y Sánchez, R. (2001). Fisiología vegetal. Madrid, España: Ediciones Pirámide. 568.

- Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C., and Mechoso, C. R. (2019). A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Scientific Reports*, 9, 15331. DOI:10.1038/s41598-019-51857-8.
- Benito, F. G. (2014). *Archivos climáticos y paleohidrológicos. Introducción a datos proxy y su análisis*. Madrid, España: CSIC- Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., Kelsey, R. G., Negrón, J. F., and Seybold, S. J. (2010). Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effects. *Bio-Science*, 60(8), 602-613. DOI:10.1525/bio.2010.60.8.6.
- Biondi, F. (2001). A 400-year Tree-ring Chronology from the Tropical Treeline of North America. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(3), 162-166. DOI:10.1579/0044-7447-30.3.162.
- Biondi, F. and Fessenden, J. E. (1999). Radiocarbon Analysis of *Pinus Laguna* Tree Rings: Implications for Tropical Dendrochronology. *Radiocarbon*, 41(3), 241-249. DOI:10.1017/S0033822200057118.
- Bigg, G. (1996). *The Oceans and Climate*. First published. Cambridge University Press. Great Britain. 266.
- Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary*. Amsterdam. Harcourt Academic Press. 613.
- Breshears, D. D., Adams, H. D., Eamus, D., McDowell, N. G., Law, D. J., Will, R. E., Williams, A. P., and 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.
- Brolsma, R. J. (2010). *Effect of climate change on temperate forest ecosystems*. Royal Dutch Geographical Society / Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht.
- Broz, A., Retallack, G. J., Maxwell, T. M., and Silva, L. C. R. (2021). A record of vapour pressure deficit preserved in wood and soil across biomes. *Scientific Reports*, 11, 662.

- Cardoza, M. G. F., Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Guerra, de la C. V., y Estrada, A. J. (2014). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del Estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 110-127.
- 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., and Castruita-Esparza, L. U. (2022). How to Extract Climate Variability from Tree-Rings. *Journal of visualized experiments, JoVE*, 181. DOI:10.3791/63414.
- Cerano, P. J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., y Guerra, de la C. V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 42-55. DOI:10.14350/rig.35190.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, A. J. G., Sánchez C. I., y Valdez C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano, P. J., Villanueva D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., y Estrada A. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 07-23.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., y Constante, G. V. (2011b). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31-45.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Méndez, G. J., y Constante, G. V. (2011a). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 235-249.
- Chaar, J. (2013). Resistencia a heladas en plantas frutales. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 109-121.

- 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., y 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. *Madera y Bosque*, 38(2), 387-399. DOI:10.4067/S0717-92002017000200016.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., and Burns, B. T. (2003). Tree-Ring Reconstructed Precipitation and Tropical Teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369-388.
- 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. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., y Estrada, A. J. (2010). Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto Técnico No.19 INIFAP, CENID-RASPA. Durango, México.
- Cook, E. R. (1985). A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. The University of Arizona.
- Cook, E. R. (1987). The Decomposition of Tree-Ring Series For Environmental Studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Cook, E. R. and Cole, J. (1991). On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change. *Climatic Change*, 19(3), 271-282.
- Cook, E. R. and Holmes, R. H. (1984). Program ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, Arizona, EUA. 15.
- Cook, E. R. and Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., and Valencia-Manzo, S. (2021). Relationship between climate

- variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 109-126. DOI:10.5154/r.rchscfa.2020.03.012.
- Day, T. A., Heckathorn, S. A., and DeLucia, E. H. (1991). Limitations of Photosynthesis in *Pinus taeda* L. (Loblolly Pine) at Low Soil Temperatures. *Plant physiol.* 96(4), 1246-1254.
- Delgado, C. S. (2000). Aplicaciones estadísticas en análisis dendrocronológicos. En F. A. Roig (Compilador), *Dendrocronología en América Latina*, 79-102.
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., y 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.
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W., and Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22(3), 237-244.
- Díaz, S. C., Touchan, R., and Swetnam, T. W. (2001). A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology*, 21(8), 1007-1019. DOI:10.1002/joc.664.
- Domínguez, A. F. A., Vargas, H. J. J., López, U. J., Ramírez, V. P., y Guízar, N. E. (2010). Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales Del Instituto De Biología Serie Botánica*, 75(2), 191-203.
- Donoso, Z. C. (1992). *Ecología forestal: el bosque y su medio ambiente*. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 319.
- Easterling, D. R., Diaz, H. F., Douglas, A. V., Hogg, W. D., Kunkel, K. E., Rogers, J. C., and Wilkinson, J. F. (1999). Long-Term Observations for Monitoring Extremes in the Americas. *Climatic Change*, 42, 285-308. DOI:10.1023/A:1005484820026.
- Fedorov, A. V. and Philander, S. G. (2001). A Stability Analysis of Tropical Ocean–Atmosphere Interactions: Bridging Measurements and Theory For El Niño. *Journal of Climate*, 14(14), 3086-3101.

- Fritts, H. C. (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London. 567.
- Fritts, H. C. (2001). *Tree-rings and climate*. Blackburn Press, Caldwell. New Jersey. 567.
- Gay, C. (2000). El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. *Gaceta UNAM*, Noviembre 13, 3411, 12-13.
- Gómez-Guerrero, A., Martínez-Molina, G., Martínez-Trinidad, T., Velázquez-Martínez, A., Sardiñas, G. O., Rivera, C., y Toruño, P. J. (2015). Índices de anillos de crecimiento en dos coníferas del Centro De México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 1(1), 134-148. DOI: 10.5377/ribcc.v1i1.2146.
- González, E. M. (2003). Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la Sierra Madre Occidental, México. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, E. M., González, E. M. del S., Villanueva, D. J., y Cerano, P. J. (2017). Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. et Fernald. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 8(42), 28-54.
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Nívar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., and 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, 39-53. DOI:10.1016/j.foreco.2005.03.012.
- González, J. J. (2019). Respuesta del crecimiento de *Pinus pseudostrobus* Lindl a las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., and Drapek, R. J. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755-768. DOI:10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x.

- Griesbauer, H. P. and Scott, G. D. (2010). Assessing the climatic sensitivity of Douglas-fir at its northern range margins in British Columbia, Canada. *Trees*, 24(2), 375-389. DOI:10.1007/s00468-009-0407-z.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- Guehl, J. M. and Aussenac, G. (1987). Photosynthesis Decrease and Stomatal Control of Gas Exchange in *Abies alba* Mill. in Response to Vapor Pressure Difference. *Plant physiology*, 83, 316-322.
- Guehl, J. M., Aussenac, G., Bouachrine, J., Zimmermann, R., Pennes, J. M., Ferhi, A., and Grieu, P. (1991). Sensitivity of leaf gas exchange to atmospheric drought, soil drought, and water-use efficiency in some Mediterranean *Abies* species. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(10), 1507-1515. DOI:10.1139/x91-211.
- Gugger, P. F., González-Rodríguez, A., Rodríguez-Correa, H., Sugita, S., and Cavender-Bares, J. (2011). Southward Pleistocene migration of Douglas-fir into Mexico: Phylogeography, ecological niche modeling, and conservation of 'rear edge' populations. *New Phytologist*, 189(4), 1185-1199. DOI:10.1111/j.1469-8137.2010.03559.x.
- Gutiérrez, G. G. (2014). La relación entre crecimiento y clima en árboles tropicales: un estudio dendrocronológico en la selva de los Tuxtlas, Veracruz, México. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutierrez, G. G. (2017). Determinación taxonómica y análisis de crecimiento de especies forestales económicamente importantes para el aprovechamiento forestal sustentable e identificación de eventos climáticos extremos (sequías) en virutas procedentes de Inventario Nacional Forestal y de Suelos de los años 2013 2014, y 2015. Ciudad de México: Reporte Técnico, FMCN-CONAFOR-USFS.
- 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, 1-14. DOI:10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676.

- Gutiérrez, M. E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En arqueología náutica mediterránea X. Nieto i M. A. Cau (eds). Monografies del CASC. Generalitat de Catalunya, 309-322.
- Harfouche, A., Meilan, R., and Altman, A. (2014). Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*, 34(11), 1181-1198. DOI:10.1093/treephys/tpu012.
- Herman, R. H. and Lavender, D. P. (1999). Douglas-fir planted forests. *New Forest*, 17, 53-70. DOI:10.1023/A:1006581028080.
- Hermann, R. K. and Lavender, D. P. (1990). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Douglas fir in Burns, R.B., Honkala, B.H. (technical coordinators), *Silvics of North America: 1. Conifers* (Agriculture Handbook 654), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C.
- Hidalgo-Sánchez, M., Ángeles-Pérez, G., Yépez, E. A., Plascencia-Escalante, F. O., Delgado-Balbuena, J., y González-Martínez, T. M. (2021). Evapotranspiración e intercambio de energía en un bosque templado de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2), 490-537. DOI:10.24850/j-tyca-2021-02-11.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Huante, P., Rincón, E., and Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico. *Tree-Ring Research*, 51, 16-28.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2), 56-61.
- Huxman, T. E., Turnipseed, A. A., Sparks, J. P., Harley, P. C., and Monson, R. K. (2003). Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 134(4), 537-546. DOI:10.1007/s00442-002-1131-1.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1983). *Síntesis geográfica de Coahuila*. México. D. F. 165.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1986). Síntesis geográfica de Nuevo León. México. D. F. 171.
- Kaennel, D. M. and Schweingruber, F. H. (1995). Multilingual Glossary of Dendrochronology. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP. Paul Haupt Publisher. Berne. 463.
- Klepac, D. (1976). Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques.
- Kozłowski, T. T. and Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and Adaptive Responses of Woody Plants to Environmental Stresses. *The Botanical Review*, 68(2), 270-334.
- Lara, A. and Villalba, R. (1993). A 3620-Year Temperature Reconstruction from *Fitzroya cupressoides* Tree Rings in Southern South America. *Science*, 260(5111), 1104-1106. DOI:10.1126/science.260.5111.1104.
- Lendzion, J. and Leuschner, C. (2008). Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings is limited by elevated atmospheric vapour pressure deficits. *Forest Ecology and Management*, 256(4), 648-655.
- León-Hernández, W. J. y Espinoza-de-Pernía, N. (2001). Anatomía de la madera (1.a ed.). Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: Diurnal variation. *Canadian Journal of Botanic*, 59(3), 349-356.
- Liu, X., Sun, G., Mitra, B., Noormets, A., Gavazzi, M. J., Domec, J. C., Hallema, D. W., Li, J., Fang, Y., King, J. S., and McNulty, S. G. (2018). Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 14-23. DOI:10.1016/j.agrformet.2018.06.025.
- Lo, Y. H., Blanco, J. A., Seely, B., Welham, C. V. J., and Kimmins, J. P. (2010). Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 932-942. DOI:10.1016/j.foreco.2009.11.033.

- 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* a variables climáticas en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1580-1596. DOI:10.15517/rbt.v66i4.32663.
- Luckman, B. H. (2007). Dendroclimatology. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 1, 465-475.
- Luna, R. A. A. (2020). Aplicación de técnicas dendrocronológicas en *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl para la reconstrucción climática en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Marlés, M. J., Valor, I. T., Claramunt, L. B., Pérez, S. D. R., Maneja, Z. R., Sánchez, M. S., y Boada, J. M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrabus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88, 19-32. DOI:10.14350/rig.43338.
- Matisons, R., Elferts, D., and Brūmelis, G. (2013). Pointer years in tree-ring width and earlywood-vessel area time series of *Quercus robur*—Relation with climate factors near its northern distribution limit. *Dendrochronologia*, 31(2), 129-139. DOI:10.1016/j.dendro.2012.10.001.
- Mátyás, C. (2010). Forecasts needed for retreating forests. *Nature*, 469, 1271. DOI:10.1038/464127a.
- McCullough, I. M., Davis, F. W., and Williams, A. P. (2017). A range of possibilities: Assessing geographic variation in climate sensitivity of ponderosa pine using tree rings. *Forest Ecology and Management*, 402, 223-233. DOI:10.1016/j.foreco.2017.07.025.
- Meinzer, F. C. (1982). The effect of vapor pressure on stomatal control of gas exchange in Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings. *Oecologia*, 54, 236-242.

- Méndez-Espinoza, C. y Vallejo, R. M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56), 33-64. DOI:10.29298/rmcf.v10i56.567.
- Muñoz, S. J. (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI:10.24381/cds.68d2bb30.
- Návar, J. and Lizárraga-Mendiola, L. (2013). Hydro-climatic variability and forest fires in Mexico's northern temperate forests. *Geofísica internacional*, 52, 5-20. DOI:10.1016/S0016-7169(13)71458-2.
- Neira, F. E. P. (1995). Desarrollo de cronologías para alerce (*Fitzroya cupressoides*) en las cordilleras de la Costa y de los Andes. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2006). National Geophysical Data Center. ITRDB. International Tree-Ring Data Bank. Boulder, Colorado.
- Ordóñez, A. (1999). Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F.
- Owston, P. W. and Stein, W. I. (1974). Pseudotsuga Carr., Douglas-Fir. In: Sociometer, C. S. (ed.) Seeds of the woody plants in United States. Agricultural Handbook 450. USDA Forest Service. Washington, DC, EUA. 674-683.
- Pallardy, S. G. (2010). Physiology of woody plants. (3ra ed.). Academic Press.
- Parnesan, C. and Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Passamai, V. y Saravia, L. (1994). Formulación de un modelo de secado solar a partir de estudios de evapotranspiración. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA*, (2), 593-599.
- Peixoto, J. and Oort, A. H. (1992). Physics of climate. New York, American Institute of Physics. 520.

- Plomion, C., Leprovost, G., and Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127(4), 1513-1523. DOI:10.1104/pp.010816.
- Reich, R. M., Lundquist, J. E., and Hughes, K. (2016). Host-environment mismatches associated with subalpine fir decline in Colorado. *Journal of Forestry Research*, 27, 1177-1189. DOI:10.1007/s11676-016-0234-1.
- Robinson, W. J. and Evans, R. (1980). A Microcomputer-Based Tree-Ring Measuring System. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59-64.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., and Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57-60.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504.
- Salinas, J. R. (2018). *Identidad y Tiempo. Esculpir el tiempo, descubrir la identidad: una reflexión en obra de escultura en madera y piedra*. Laboratorio de Dendrocronología de Universidad Austral de Chile.
- Schulman, E. (1944). Dendrochronology in Mexico, I. *Tree-Ring Bulletin*, 10(3), 18-24.
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic Changes in Semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson. 142.
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree Rings. Basics and applications of dendrochronology*. Dordrecht, Kluwer. 276.
- Scott, S. D. (1966). *Dendrochronology in Mexico*. Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press, Tucson. 80.
- Sheppard, L. J. and Cape, J. N. (2013). *Forest Growth Responses to the Pollution Climate of the 21st Century*. Springer-Science and Business Media, B.V.
- Smith, T. M., Leemans, R., and Shugart, H. H. (1992). Sensitivity of terrestrial carbon storage to CO₂-induced climate change: Comparison of 4 scenarios based on general circulation models. *Climatic Change*, 21, 367-384. DOI:10.1007/BF00141377.

- Stahle, D. W. and Cleaveland, M. K. (1993). Southern Oscillation Extremes Reconstructed from Tree Rings of the Sierra Madre Occidental and southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6(1), 129-140. DOI:10.1175/1520-0442(1993)006<0129:SOERFT>2.0.CO;2.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., Dunbar, R. B., Therrell, M. D., Gay, D. A., Moore, M. D., Stokes, M. A., Burns, B. T., Villanueva-Díaz, J., and Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152.
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Paull, G. J., Burns, B. T., Salinas, W., Suzan, H., and Fule, P. Z. (2000). Recent Tree-Ring Research in Mexico, *Dendrocronología en América Latina*, Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. 285-305.
- Stat Soft Inc. (2000). *STATISTICA Software, Kernel version 5.5 A. 1984-2000*. Tulsa, Oklahoma, EUA.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press. 73.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. University of Arizona Press. 73.
- Swetnam, T. W., Thomson, M. A., and Sutherland, E. K. (1985). Using Dendrochronology To Measure Radial Growth of Defoliate Trees. *Spruce Budworms Handbook*. 639.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (1991). *Plant Physiology*. Redwood City. 482-487.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., and Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(14), 1-8. DOI:10.1029/2001JD000851.
- Villalba, R. (1990). Climatic fluctuations in northern Patagonia during the last 1000 years as inferred from tree-ring records. *Quaternary Research* 34(3), 346-360. DOI:10.1016/0033-5894(90)90046-N.

- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Constante, G. V., Fulé, P. Z., y Cornejo, O. E. H. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques*, 15(3), 45-64.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Fulé, P. Z., Cortés, M. C., Vázquez, S. L., Yocom, L. L., y Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones geográficas*, (87), 141-153. DOI:10.14350/rig.44485.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, D. W., Estrada, A. J., y Constante, G. V. (2008). Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 49.
- Villanueva-Díaz, J. and McPherson., G. R. (1995). Forest stand structure in mountains of Sonora, Mexico and New Mexico, EUA. In: DeBano, L.F., P.E. Ffolliott, A. Ortega-Rubio, G. J. Gottfried, R. H. Hamre and C. E. Edminster (tech. coord.). (1995). Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago: The Sky. Islands of the Southwestern United States and Northern Mexico. USDA-Forest Service, General Technical Report RM-GTR-264, 416-423.
- Villanueva-Díaz, J. and McPherson, G. R. (1996). Reconstruction of Precipitation and PDSI from Tree-Ring Chronologies Developed in Mountains of New Mexico, EUA and Sonora, Mexico. *Ariz-Nev Acad Sci Hydrol Sect*, 26, 45-54.
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., y Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1-14. DOI:10.21829/myb.2018.2411464.
- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., y Therrell, M. D. (2020). Estado actual de la dendrocronología en México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 25(88), 5-36.

- Villanueva-Diaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., and Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83, 117-131.
- Villers, R. L. and Trejo, V. I. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*, 9(1), 87- 93. DOI:10.3354/cr009087.
- VoorTech. (2007). Measure J2X software. The tree ring measuring program.
- Walker, B. H. and Steffen, W. L. (1996). *Global Change and Terrestrial Ecosystems* (2). Cambridge University Press.
- Walker, B. H. and Steffen, W. L. (1999). Interactive and Integrative Effects of Global Change on Terrestrial Ecosystems. In: Walker, B., Steffen, W., Candell, J. and Ingram, J., Eds., *The Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for Natural and Managed Ecosystems, Synthesis Volume, International Geosphere-Biosphere Program Book Series 4*, Cambridge University Press, Cambridge, 329-375.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Trevor J. C. Beebee, Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F. (2002). Ecological Responses to recent Climate Change. *Nature*, 416(6879), 389-395. DOI:10.1038/416389a.
- West, G. H. (2011). *Defining the Regional and Seasonal Climatic Response of Long Douglas-Fir Tree-Ring Chronologies in central Mexico*. Tesis de maestría, Universidad de Arkansas. Fayetteville, EUA.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., and Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J Clim Appl Meteorol*, 23, 201-213.
- 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., and McDowell, N. G. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 3, 292-297. DOI:10.1038/NCLIMATE1693.

Worral, J. J., Rehfeldt, G. E., Hamann, A., Hogg, E. H., Marchetti, S. B., Michaelian, M., and Gray, L. K. (2013). Recent declines of *Populus tremuloides* in North America linked to climate. *Forest Ecology and Management*, 299, 35-51. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.12.033.