

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y DEL FENÓMENO ENOS EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pinus rzedowskii* Y *P. martinezii* EN MICHOACÁN, MÉXICO

INFLUENCE OF CLIMATE VARIABILITY AND THE ENSO PHENOMENON ON THE RADIAL GROWTH OF *Pinus rzedowskii* AND *P. martinezii* IN MICHOACÁN, MEXICO

Manzanilla Quiñones, U., P. Delgado Valerio, T. Carlón-Allende

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y DEL FENÓMENO ENOS EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pinus rzedowskii* Y *P. martinezii* EN MICHOACÁN, MÉXICO

INFLUENCE OF CLIMATE VARIABILITY AND THE ENSO PHENOMENON ON THE RADIAL GROWTH OF *Pinus rzedowskii* AND *P. martinezii* IN MICHOACÁN, MEXICO



Influencia de la variabilidad climática y del fenómeno ENOS en el crecimiento radial de *Pinus rzedowskii* y *P. martinezii* en Michoacán, México

Influence of climate variability and the ENSO phenomenon on the radial growth of *Pinus rzedowskii* and *P. martinezii* in Michoacán, Mexico

Ulises Manzanilla Quiñones,
Patricia Delgado Valerio,
Teodoro Carlón Allende

INFLUENCIA DE LA
VARIABILIDAD
CLIMÁTICA Y DEL
FENÓMENO ENOS EN EL
CRECIMIENTO RADIAL DE
Pinus rzedowskii Y *P.*
martinezii EN MICHOCACÁN,
MÉXICO

INFLUENCE OF CLIMATE
VARIABILITY AND THE
ENSO PHENOMENON ON
THE RADIAL GROWTH OF
PINUS RZEDOWSKII AND *P.*
MARTINEZII IN
MICHOCACÁN, MEXICO


POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 145-163. Enero 2026

DOI:

10.18387/polibotanica.61.8

Ulises Manzanilla-Quñones / ulises.manzanilla@umich.mx 

<https://orcid.org/0000-0001-9988-7577>

Patricia Delgado-Valerio

<https://orcid.org/0000-0002-3975-8105>

Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Paseo Lázaro Cárdenas 2290. Colonia Emiliano Zapata. C.P: 60170, Uruapan, Michoacán, México

Teodoro Carlón-Allende

<https://orcid.org/0000-0002-0080-6114>

SECIHTI-Instituto de Geofísica Unidad Michoacán
Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro número 8701.
Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta.
C.P: 58190, Morelia, Michoacán, México

RESUMEN: En Michoacán, son escasos los estudios que han analizado el comportamiento de la variabilidad hidroclimática mediante el uso de anillos de crecimiento. El presente estudio evaluó la influencia de la variabilidad climática y del fenómeno ENOS sobre el crecimiento radial de *Pinus rzedowskii* y *P. martinezii* en Michoacán, México. Se fecharon 18 árboles (45 muestras) de *P. rzedowskii* y 12 árboles (31 muestras) de *P. martinezii*. En ambas especies, se midió el ancho de anillo total en un micrómetro. Posteriormente, se efectuaron análisis de correlación Bootstrap entre las cronologías de cada especie y los datos climáticos y oceánicos (Índice Multivariado de ENOS, IME). Se encontró que, *P. rzedowskii* respondió de manera positiva significativa con la precipitación de enero-marzo (1945-2015; $r > 0.28$; $p < 0.05$). La respuesta en temperatura máxima, media, mínima no fue significativa (1945-2015; $r < 0.28$; $p < 0.05$). Del mismo modo, la especie no fue afectada por IME (1972-2015; $r < 0.25$; $p < 0.05$). *P. martinezii* respondió de manera positiva significativa con la precipitación de enero, abril, junio, agosto y octubre (1953-2016; $r > 0.28$; $p < 0.05$). La especie presentó una respuesta negativa significativa con la temperatura máxima de los seis meses previos y 12 meses actuales (1953-2016; $r = -0.31$; $p < 0.05$), mientras que la influencia de IME en sus fases "El Niño" y "La Niña" tuvieron un efecto dipolar en el crecimiento de *P. martinezii*. Pese a que ambas especies presentan un potencial dendroclimático bajo, la dicotomía hallada en *P. rzedowskii* y *P. martinezii* sobre sus distintas respuestas climáticas-oceánicas ayudaría a planear futuras estrategias de manejo y conservación de ambas especies.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, Dendrocronología, ENOS, *Pinus martinezii*, *Pinus rzedowskii*, series de crecimiento

ABSTRACT: In Michoacán, few studies have analyzed hydroclimatic variability using tree rings. This study evaluated the influence of climate variability and the ENSO phenomenon on the radial growth of *Pinus rzedowskii* and *P. martinezii* in Michoacán, Mexico. Eighteen trees (45 samples) of *P. rzedowskii* and 12 trees (31 samples) of *P. martinezii* were dated. In both species, the total ring width was measured with a micrometer. Subsequently, Bootstrap correlation analyses were performed between the chronologies of each species and climatic and oceanic data (Multivariate ENSO Index, MEI). It was found that *P. rzedowskii* responded significantly positively to precipitation from January to March (1945-2015; $r > 0.28$; $p < 0.05$). The response in maximum, average, and minimum temperature was not significant (1945-2015; $r < 0.28$; $p < 0.05$). Similarly, the species was not affected by MEI (1972-2015; $r < 0.25$; $p < 0.05$). *P. martinezii* responded significantly positively to precipitation in January, April, June, August, and October

(1953-2016; $r > 0.28$; $p < 0.05$). The species showed a significant negative response to the maximum temperature of the previous six months and the current 12 months (1953-2016; $r = -0.31$; $p < 0.05$), while the influence of MEI in its “El Niño” and “La Niña” phases had a dipolar effect on the growth of *P. martinezii*. Although both species have low dendroclimatic potential, the dichotomy found in *P. rzedowskii* and *P. martinezii* regarding their different climatic-oceanic responses would help in planning future management and conservation strategies for both species.

Key words: Tree-ring, Dendrochronology, ENOS, *Pinus martinezii*, *Pinus rzedowskii*, growth series

INTRODUCCIÓN

El crecimiento radial de las especies arbóreas que habitan los ecosistemas forestales de todo el mundo se encuentra determinado en gran medida por la presencia y dominancia de factores ambientales, los cuales se encargan de moldear el crecimiento radial anual por medio de la formación de anillos anuales de crecimiento (Fritts, 1976; Speer, 2010).

En la actualidad, los anillos anuales de crecimiento de las especies arbóreas se han empleado como bioindicadores biológicos “proxy”, es decir, como fuentes indirectas para la obtención de información del ambiente donde estos crecen, asimismo, la información extraída de la variación en el grosor de los anillos de crecimiento, representan con un alto grado de confiabilidad el comportamiento de las fluctuaciones ocurridas a diferentes escalas temporales y espaciales en muchas regiones geográficas del mundo (Stahle, *et al.*, 2016; Villanueva-Díaz J. , *et al.*, 2018; Manzanilla-Quiñones, Aguirre-Calderón, Villanueva-Díaz, Martínez-Sifuentes, & Delgado-Valerio, 2021) por lo que, a este tipo de análisis, se les conoce como estudios dendrocronológicos. Los estudios dendrocronológicos se han consolidado como una fuente valiosa y confiable para evaluar la relación entre el crecimiento radial y variables climáticas como precipitación y temperatura en muchas partes del mundo (Vejpustková & Čihák, 2019; Yang, *et al.*, 2020; Manzanilla-Quiñones, Delgado-Valerio, & Molina-Sánchez, 2024). Lo que, ha permitido determinar con precisión el comportamiento histórico del clima, principalmente, la variabilidad de la precipitación (Stahle, *et al.*, 2016; Villanueva-Díaz J. , *et al.*, 2018; Carlón, Villanueva. D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021), así como evaluar la influencia de fenómenos océano-atmosféricos de escala global, principalmente El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre el crecimiento radial arbóreo (Stahle, *et al.*, 2016; Carlón, Villanueva. D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021), Asimismo, ha contribuido a la comprensión de la dinámica ecológica de los regímenes de intensidad y frecuencia del fuego presentes en las masas y rodales forestales, evaluación de la incidencia de plagas forestales (Cerano-Paredes, *et al.*, 2019; Cervantes-Martínez, *et al.*, 2019), así como el desarrollo de estrategias de prevención de desastres naturales como deslaves y derrumbes de montañas o cerros, los cuales representan un riesgo para la población rural circundante (De la Peña, Mendoza, Carlón-Allende, Macías-Vázquez, & Villanueva-Díaz, 2024; Vázquez-Selem, Franco-Ramos, Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, & Stahle, 2025).

La investigación de tipo dendrocronológica en México ha tenido un notorio avance significativo en los últimos 30 años (Carlón-Allende, De la Peña, Villanueva-Díaz, & Macías-Vázquez, 2025) no obstante, a pesar de este gran avance en la disciplina, aún existen muchos vacíos de información (áreas geográficas y especies arbóreas, principalmente latifoliadas) que no han sido evaluadas desde una perspectiva dendrocronológica (Acosta-Hernández, Pompa-García, & Camarero, 2017; Carlón-Allende, De la Peña, Villanueva-Díaz, & Macías-Vázquez, 2025) las cuales pueden y ayudarían a contribuir a un mejor entendimiento de la variabilidad hidroclimática de una región geográfica.

Debido a su posición geográfica, relieve y amplia diversidad de climas presentes, México es una nación que posee una gran riqueza biológica, con una alta presencia de organismos biológicos de flora y fauna endémicos y exclusivos al territorio nacional (Biodiversidad Mexicana, 2024). En el orden de las coníferas, específicamente, el género *Pinus* es considerado como uno de los géneros más diversos en nuestro país, las estimaciones actuales hacen mención de un 50% del

total de taxas existentes a escala global, con una presencia marcada de 52 especies, dos subespecies, 14 variedades y cuatro formas (Perry, 1991). Asimismo, se tiene registro de 22 especies de pinos que son endémicas a la superficie nacional, esto último, permite clasificar a México, como un centro secundario de diversificación de estas especies a nivel mundial (Gernandt & Pérez de la Rosa, 2014).

Para el caso específico del estado de Michoacán de Ocampo, los estudios dendrocronológicos realizados a través del uso de anillos de crecimiento de especies arbóreas, específicamente en ejemplares pertenecientes a la familia Pinaceae corresponden a *Abies religiosa* Kunth Schltldt et Cham (Huante, Rincón, & Swetnam, 1991; Cerano-Paredes, et al., 2014; Carlón, Mendoza, Salicrup, Villanueva, & Lara, 2016), *P. devoniana* Lindl (Marlés, et al., 2015), *P. pseudostrobus* Lindl (Carlón, Mendoza, Salicrup, Villanueva, & Lara, 2016) y *P. hartwegii* Lindl (Carlón, Villanueva, D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021; Manzanilla-Quiñones, Aguirre-Calderón, Villanueva-Díaz, Martínez-Sifuentes, & Delgado-Valerio, 2021) por lo que aún existen muchas especies de esta familia, que aún no han sido evaluadas desde un enfoque dendrocronológico.

P. rzedowskii Madrigal et Caballero y *P. martinezii* E. Larsen, son especies de pinos endémicas y en peligro o vías de extinción, ambas especies presentan poblaciones aisladas y tienen una distribución restringida y discontinua, limitada exclusivamente al polígono del estado de Michoacán (Delgado, Pinero, Chaos, Pérez, & Álvarez, 1999; Contreras-Bailón, et al., 2025). Afortunadamente, ambas especies se encuentran bajo protección legal por la Norma Oficial Mexicana 059 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2010) lo que, hasta cierto punto, garantiza su conservación en la naturaleza. Desde su descripción, han sido escasamente estudiadas, por lo que se desconocen diversos aspectos biológicos de estas taxa, entre ellos la señal de tipo dendrocronológica registrada en sus anillos de crecimiento. Por lo tanto, bajo este trasfondo, el presente estudio pretende evaluar la influencia de la variabilidad climática y del fenómeno ENOS sobre el crecimiento radial de *Pinus rzedowskii* y *P. martinezii* en dos sitios ubicados en el estado de Michoacán, México. Por lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos: 1) identificar la variable climática más limitante e influyente en el crecimiento radial de cada especie y 2) estimar la influencia del Índice Multivariado del Niño Oscilación del Sur (IME) en el crecimiento radial de las especies analizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los árboles estudiados de *P. rzedowskii* se distribuyen dentro del municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán, entre las coordenadas geográficas 18° 42' 9.4'' y 18° 41' 38.2'' de latitud norte y 103° 0' 41.5'' y 103° 0' 3.6'' de longitud oeste, mientras que los árboles analizados de *P. martinezii* se encuentran dentro del municipio de Hidalgo, Michoacán, entre las coordenadas geográficas 19° 45' 03.1'' y 19° 42' 57.1'' de latitud norte y 100° 43' 16.3'' y 100° 40' 16.9'' de longitud oeste (Figura 1).

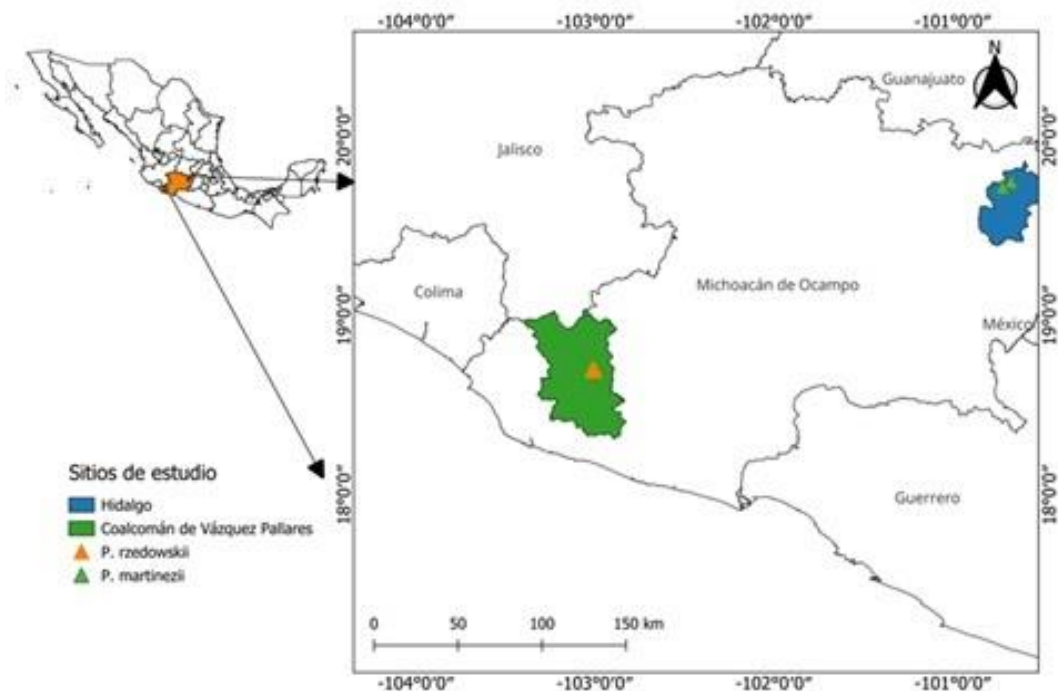


Figura 1. Localización geográfica de los sitios de estudio de *P. rzedowskii* y *P. martinezii* en Michoacán, México.
Figure 1. Geographic location of the study sites for *P. rzedowskii* and *P. martinezii* in Michoacán, Mexico.

Descripción ambiental

Los árboles evaluados de *P. rzedowskii* crecieron en un clima semicálido subhúmedo AC(w2) con una temperatura promedio anual mayor a 18 °C y una temporada de lluvias marcada durante el verano (Cuervo-Robayo, *et al.*, 2014). La altitud promedio del sitio de muestreo es de 2308 msnm con una exposición hacia el sureste y una pendiente promedio de 7.2%. El suelo dominante del lugar es de tipo Luvisol crómico (Lc) (INEGI, 2014), mientras que la vegetación dominante corresponde a Bosque de Pino (INEGI, 2021).

Los árboles estudiados de *P. martinezii* crecieron en un clima templado subhúmedo C(w2), con una temperatura promedio anual de 12 a 18 °C y una estación de lluvias durante el verano (Cuervo-Robayo, *et al.*, 2014). La altitud promedio del sitio de muestreo es de 2439 msnm, con una exposición dominante sureste y una pendiente promedio de 18.6%. El tipo de suelo dominante corresponde a Andosol húmico (Th), mientras que los tipos de vegetación dominantes corresponden a Bosque de Pino-Encino y Vegetación Secundaria Arbórea de Bosque de Pino (INEGI, 2021).

Muestreo dendrocronológico

Para la toma de datos del presente estudio, se aplicó un muestreo dendrocronológico de tipo selectivo, el cual consistió en la selección de 22 árboles sanos de *P. rzedowskii* y 20 árboles de *P. martinezii*. La toma de datos dendrocronológicos se efectuó en el mes de abril de 2022 para *P. rzedowskii*, mientras que para *P. martinezii*, la toma de datos se efectuó en el mes de marzo de 2023. En el levantamiento de datos, se procedió a extraer tres núcleos de crecimiento por cada árbol analizado con ayuda de un taladro de Pressler marca Haglöf® de 50 cm de longitud y diámetro de 5.15 mm, así como también se midió el diámetro normal con una cinta métrica. Las muestras fueron tomadas a 1.3 m (diámetro normal) de altura del suelo, en dirección

perpendicular a la pendiente. Posteriormente, las muestras se depositaron en popotes de papel perforados, esto con la finalidad de evitar su pudrición y posterior análisis en el laboratorio.

Procesamiento y fechado de muestras

Las muestras se colocaron sobre moldes de madera (portavirutas) para ser pulidas con ayuda de diferentes tipos de lijas (60 a 1200 granos por cm^2), posteriormente fueron prefechadas y analizadas mediante técnicas dendrocronológicas tradicionales (Fritts, 1976).

El fechado de las muestras se realizó mediante técnicas de fechado cruzado, lo que permitió asignar el año exacto de formación a cada anillo de crecimiento, así como identificar anomalías en el crecimiento como anillos falsos, dobles o perdidos en el tiempo (Fritts, 1976; Grissino-Mayer, 2001). La medición del ancho de anillo total de ambas especies se llevó a cabo con ayuda de un sistema de medición VELMEX® (Robinson & Evans, 1980). En la Figura 2 se pueden los observar los anillos de crecimiento de *P. rzedowskii* (A) y *P. martinezii* (B).

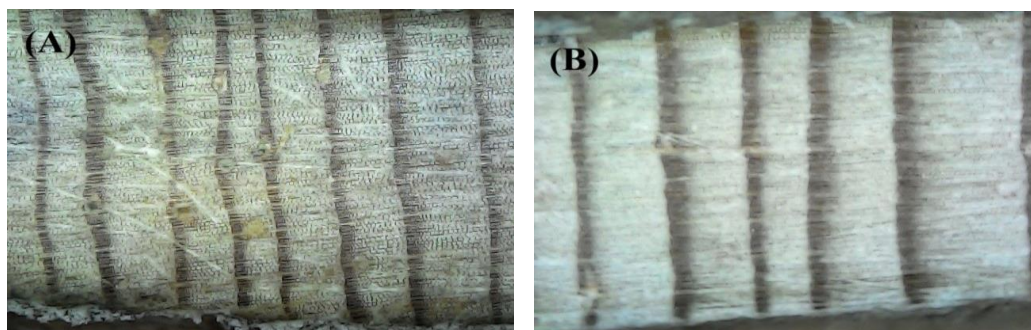


Figura 2. Anillos de crecimiento de *P. rzedowskii* (A) y *P. martinezii* (B).

Figure 2. Tree-ring of *P. rzedowskii* (A) and *P. martinezii* (B).

La calidad del fechado de anillos se efectuó en el programa Cofecha (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001) mediante correlaciones de Pearson de las mediciones de las muestras, en segmentos de 50 años, con traslapes cada 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). La calidad y precisión del fechado de muestras se evaluó mediante el umbral de confianza de $r > 0.328$ ($p < 0.01$), donde para que un fechado sea estadísticamente confiable, debe presentar un valor de intercorrelación entre series mayor a 0.328 (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las series de crecimiento de anillo total de *P. rzedowskii* y *P. martinezii* se generaron en el programa Arstan, el cual se encargó de estandarizar las mediciones de ancho de anillo. El proceso de estandarización consistió en ajustar curvas exponenciales negativas a las series de crecimiento, con el objetivo de reducir la varianza entre las medidas de las series dendrocronológicas relacionadas con la edad y transformar la variación del grosor del ancho de anillos en índices adimensionales (Briffa & Jones, 1990). Posteriormente, se les aplicó un Spline cúbico suavizado de 128 años, conservando el 50% de la varianza y el 67% de la longitud de la serie de crecimiento (Cook, 1987); esto último, permite resaltar las tendencias del comportamiento del crecimiento radial de las especies. La aplicación de estos ajustes permitió destacar la señal de interés, eliminando factores biológicos del crecimiento radial y maximizando las variaciones climáticas de alta frecuencia (sequías, años húmedos, etc.) registradas en el grosor de los anillos de crecimiento (Fritts, 1976; Cook, 1987).

Análisis dendrocronológico

Los parámetros dendrocronológicos utilizados en la evaluación del potencial dendrocronológico de las series dendrocronológicas de *P. rzedowskii* y *P. martinezii* fueron intercorrelación entre series (ICS), sensibilidad media (SM), autocorrelación de primer orden (APO), variación del primer componente principal (VPC), señal expresada de la población (SEP) y relación señal-ruido (RSR).

Datos climáticos

La información de tipo climática se obtuvo de la plataforma del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE, 2024). Esta información correspondió a los valores mensuales de precipitación y temperatura (máxima, promedio y mínima) de las estaciones meteorológicas con registros mayores a 30 años y cercanas a los sitios de estudio. Para la especie *P. rzedowskii*, las estaciones meteorológicas seleccionadas fueron Aguililla, Apatzingán (SMN) y Coalcomán (SMN) mientras que, para *P. martinezii*, se seleccionaron las estaciones meteorológicas de Presa Pucuateo, Presa Sabaneta y Huajumbaro. Los registros descargados de las estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los registros climáticos descargados de las estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de *P. rzedowskii* y *P. martinezii*.

Table 1. Description of climate records downloaded from weather stations near the sites of *P. rzedowskii* and *P. martinezii*.

Especie	Estación Meteorológica	Clave Conagua	Coordenadas Latitud (N) Longitud (W)	Altitud (msnm)	Variable	Periodo de actividad	Datos completos (%)
<i>P. rzedowskii</i>	Aguililla	16003	N 18°43'59.78" W 102°45'45.04"	896	Precipitación	1943-1982	99.6
					Temperatura máxima	1961-1982	68.5
					Temperatura media	1961-1982	68.5
					Temperatura mínima	1961-1982	68.5
	Coalcomán (SMN)	16154	N 18°45'59.93" W 103° 9'8.73"	1044	Precipitación	1936-1988	100
					Temperatura máxima	1937-1988	98.2
					Temperatura media	1937-1988	98.2
					Temperatura mínima	1937-1988	98.2
	Apatzingán (SMN)	16007	N 19° 5'18.80" W 102°21'21.01"	326	Precipitación	1945-2015	100
					Temperatura máxima	1945-2015	99.6
Temperatura media					1945-2015	99.6	
Temperatura mínima					1945-2015	99.6	
<i>P. martinezii</i>	Presa Pucuateo	16097	N 19°37'19.52" W 100°41'10.02"	2490	Precipitación	1951-2018	90.1
					Temperatura máxima	1951-2018	90.3
					Temperatura media	1951-2018	90.3
					Temperatura mínima	1951-2018	90.3
	Presa Sabaneta	16098	N 19°36'35.83" W 100°40'9.68"	2510	Precipitación	1953-2016	99.1

Especie	Estación Meteorológica	Clave Conagua	Coordenadas Latitud (N) Longitud (W)	Altitud (msnm)	Variable	Periodo de actividad	Datos completos (%)
					Temperatura máxima	1953-2016	95.8
					Temperatura media	1953-2016	95.8
					Temperatura mínima	1953-2016	95.8
	Huajumbaro	16235	N 19°40'44.88" W 100°44'30.36"	2285	Precipitación	1984-2021	94.2
					Temperatura máxima	1984-2021	94.4
					Temperatura media	1984-2021	94.4
					Temperatura mínima	1984-2021	94.4

Los registros faltantes de precipitación y temperatura máxima, promedio y mínima de las estaciones meteorológicas fueron estimados mediante la aplicación de medias móviles de orden $n=5$ (Schulz, 1976). Debido al alto porcentaje de datos incompletos presentados por la estación meteorológica de Aguililla, se optó por descartar esta estación de los análisis posteriores.

Respuesta crecimiento y clima

Se obtuvieron los valores de los coeficientes de correlación entre las cronologías y los datos climáticos para cada especie mediante el uso del programa Dendroclim con un nivel de significancia de $P<0.05$ (Biondi & Waikul, DendroClim2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies, 2004). El análisis se efectuó en ventanas temporales de 18 meses, es decir, se analizaron los seis meses previos al año de crecimiento y los 12 meses del año actual de crecimiento (Carlón, Villanueva, D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021) con la finalidad evaluar meses y/o estaciones que más influyeron en el crecimiento radial de ambas especies.

Influencia de ENOS

Se descargaron los datos del Índice Multivariado del Niño oscilación del Sur (IME) de la plataforma National Oceanic Administration Agency (NOAA, 2024) el cual sirvió para estimar la influencia de IME sobre el crecimiento radial de *rzedowskii* y *P. martinezii*. El análisis se realizó en ventanas temporales de 18 meses, es decir, se analizaron los seis meses previos y los 12 meses actuales (Carlón, Villanueva, D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021) mediante correlaciones Bootstrap en el programa Dendroclim con un nivel de significancia de $p < 0.05$ (Biondi & Waikul, DendroClim2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies, 2004). De manera similar, se efectuaron análisis de correlación de Pearson entre los años considerados como extremos (valores de IAA < 0.9 ; IAA > 1.1) y los valores mensuales de IME de los periodos; 1979-2021 para *P. rzedowskii* y 1979-2022 para *P. martinezii*, con el objetivo de determinar años o periodos de influencia del fenómeno en sus diferentes fases; “El Niño” y “La Niña” sobre el crecimiento radial de las especies.

RESULTADOS

Series de crecimiento de ancho de anillo

El número de núcleos de crecimiento fechados para la elaboración de la serie de crecimiento de ancho de anillo de *P. rzedowskii* fue de 45 muestras (68.2%) correspondiente a 18 árboles, mientras que para la realización de la serie de crecimiento de ancho de anillo de *P. martinezii* se

fecharon 31 muestras (51.7%) correspondiente a 12 árboles. El porcentaje restante de las muestras fue descartado del análisis, debido a que presentaron problemas de crecimiento, lo que ocasionó que los valores de intercorrelación entre series fueran menores al umbral mínimo confiable ($r < 0.328$). Las series de crecimiento (núcleos de crecimiento) que se lograron fechar de manera correcta presentaron valores de intercorrelaciones entre series (ICS) de $r = 0.40$ ($p < 0.01$) con una extensión temporal que abarco el periodo de 1731-2021 para *P. rzedowskii* (Figura 3) y de $r = 0.36$ ($p < 0.01$) con una extensión temporal que abarco el periodo de 1908-2022 para *P. martinezii* (Figura 4).

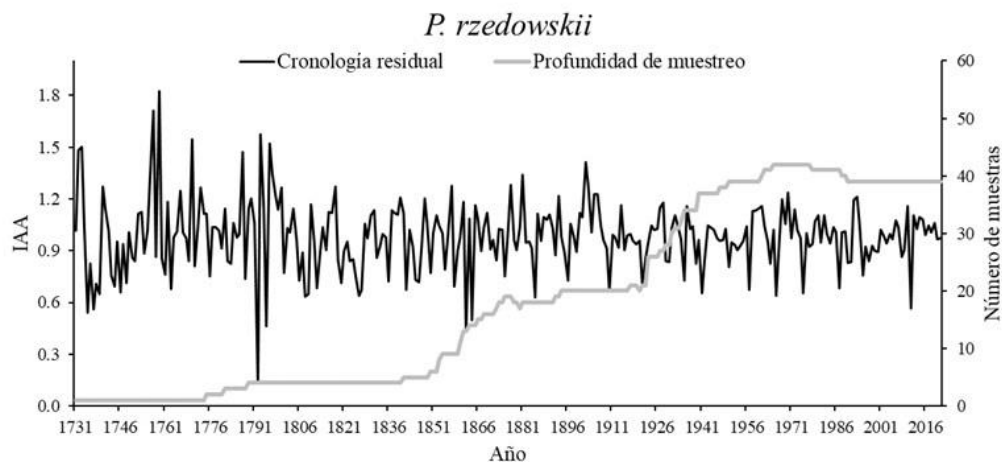


Figura 3. Cronología residual generada para *P. rzedowskii*.

Figure 3. Residual chronology developed for *P. rzedowskii*.

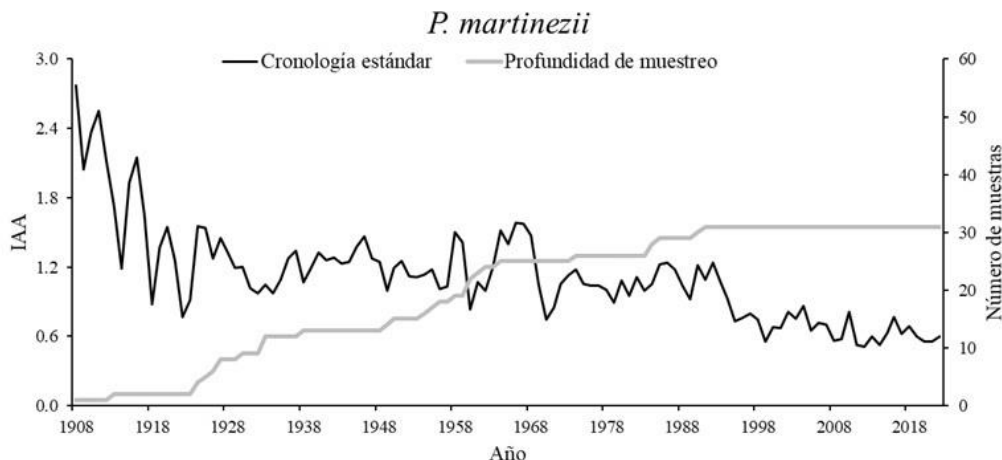


Figura 4. Cronología estándar generada para *P. martinezii*.

Figure 4. Standard chronology developed for *P. martinezii*.

Parámetros dendrocronológicos

Los resultados de los parámetros dendrocronológicos obtenidos para *P. rzedowskii* (cronología residual) y *P. martinezii* (cronología estándar) se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros dendrocronológicos calculados para *P. rzedowskii* y *P. martinezii*.
Table 2. Dendrochronological parameters calculated for *P. rzedowskii* and *P. martinezii*.

Especie	Parámetros dendrocronológicos				
	SM	APO	VPC (%)	SEP (>0.85)	RSR (%)
<i>P. rzedowskii</i>	0.20	0.31	15.65	1941-2021	1.97
<i>P. martinezii</i>	0.15	0.74	45.46	1930-2022	16.67

SM: Sensibilidad media, APO: Autocorrelación de primer orden, VPC: Variación del primer componente principal, SEP: Señal expresada de la población, RSR: Relación señal-ruido.

Influencia del clima

Los resultados del análisis de correlación entre los registros de precipitación mensual de 1945-2015 de la estación meteorológica Apatzingán y la cronología de *P. rzedowskii* indicaron una asociación significativa positiva ($p < 0.05$) durante los meses de enero ($r = 0.34$), febrero ($r = 0.30$) y marzo ($r = 0.28$) del año actual del crecimiento, del mismo modo, se encontró una asociación significativa negativa ($r = -0.26$, $p < 0.05$) para el mes de agosto del año anterior del crecimiento (Figura 5A).

Para el caso del análisis de la temperatura máxima, no se presentaron valores significativos de correlación en ninguno de los 18 meses evaluados del periodo 1945-2015 ($r < 0.28$, $p > 0.05$, Figura 5B). De la misma manera que, para la temperatura media, no se presentó correlación significativa, ya sea de tipo positiva o negativa (1945-2015; $r < 0.20$, $p > 0.05$, Figura 5C), lo mismo ocurrió para la temperatura mínima, donde no se identificó ninguna correlación significativa (1945-2015; $r = -0.23$; $p > 0.05$; Figura 5D).

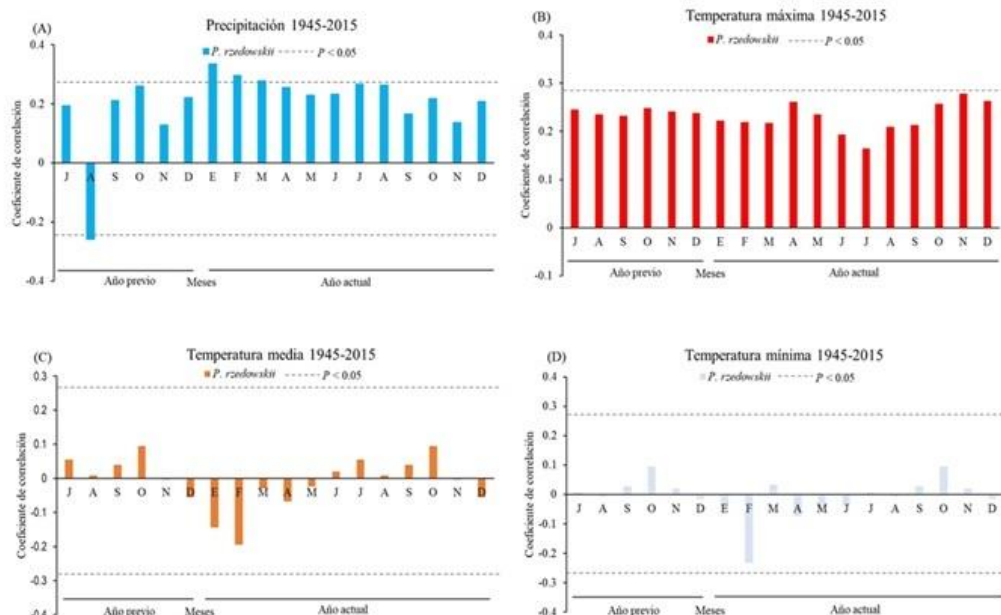


Figura 5. Coeficientes de correlación entre la cronología de *P. rzedowskii* y los registros mensuales de precipitación (A), temperatura máxima (B), temperatura media (C) y temperatura mínima (D). La línea gris discontinua indica el nivel de significancia de cada variable.

Figure 5. Correlation coefficients between the chronology of *P. rzedowskii* and monthly records of precipitation (A), maximum temperature (B), average temperature (C), and minimum temperature (D). The gray dashed line indicates the significance level of each variable.

Los resultados del análisis de correlación entre los registros de precipitación mensual de 1953-2016 de la estación meteorológica Presa Sabaneta y la cronología de *P. martinezii* indicaron una correlación significativa positiva ($p < 0.05$) durante los meses de enero ($r = 0.30$), abril ($r = 0.38$), junio ($r = 0.39$), agosto ($r = 0.43$) y octubre ($r = 0.28$) del año actual del crecimiento (Figura 6A). Para el caso del análisis de la temperatura máxima, se presentaron valores de correlación negativos significativos entre la cronología de *P. martinezii* y los 18 meses de 1953-2016 ($r > 0.30$, $p < 0.05$), siendo los meses de febrero y mayo, los que presentaron los valores de correlación más altos ($r = -0.60$ y $r = -0.62$; Figura 6B).

Para la temperatura media, se identificó una correlación significativa negativa para los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre del año anterior (1953-2016; $r > 0.37$; $p < 0.05$) del año anterior del crecimiento, así como una correlación negativa con los meses de enero a octubre del año actual de crecimiento de 1953-2016 ($r > 0.32$; $p < 0.05$; Figura 6C).

Para la temperatura mínima, se encontró una asociación positiva significativa para el mes de diciembre del año anterior y diciembre del año actual de crecimiento de 1953-2016 ($r = 0.29$; $p < 0.05$; Figura 6D).

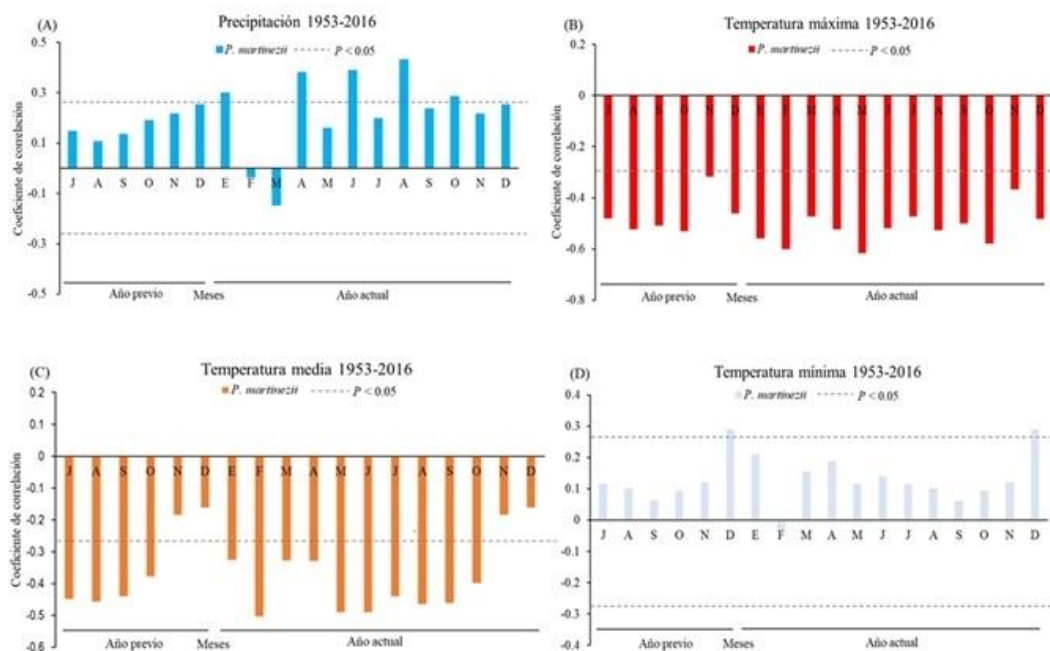


Figura 6. Coeficientes de correlación entre la cronología de *P. martinezii* y los registros mensuales de precipitación (A), temperatura máxima (B), temperatura media (C) y temperatura mínima (D). La línea gris discontinua indica el nivel de significancia de cada variable.

Figure 6. Correlation coefficients between the chronology of *P. martinezii* and monthly records of precipitation (A), maximum temperature (B), average temperature (C), and minimum temperature (D). The gray dotted line indicates the significance level of each variable.

Influencia de ENOS

Los resultados del análisis de correlación entre la cronología de *P. rzedowskii* y el índice IME indicaron una débil influencia positiva no significativa de IME sobre el crecimiento radial de la especie durante los 18 meses evaluados del periodo 1979-2021 ($r < 0.22$; $p > 0.05$; Figura 7). Por otra parte, los resultados del análisis de correlación entre los años extremos (Tabla 3) y los valores mensuales de IME indicaron una débil influencia negativa de IME sobre el crecimiento radial durante los meses de enero-diciembre de los años 1987, 1990, 1991, 1995, 1997, 1999, 2000, 2008 y 2011 ($r = -0.15$; $p < 0.05$), mientras que, para los años 1992, 1993, 2010 y 2011 se encontró

una fuerte correlación positiva no significativa con el promedio mensual de enero-junio ($r= 0.91$; $p > 0.05$).

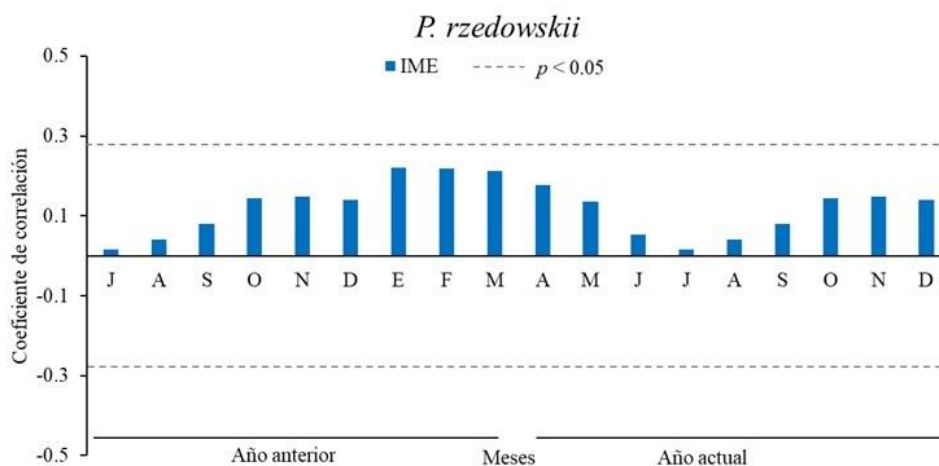


Figura 7. Coeficientes de correlación entre la cronología de *P. rzedowskii* y el índice IME del periodo 1979-2021.

Figure 7. Correlation coefficients between the chronology of *P. rzedowskii* and the IEM index for the period 1979–2021.

Por otra parte, los resultados del análisis de correlación entre la cronología de *P. martinezii* y el índice IME indicaron una correlación positiva significativa ($r > 0.26$; $p < 0.05$) que se extendió desde diciembre del año anterior de crecimiento hasta diciembre del año actual de crecimiento del periodo 1979-2022 (excepto agosto; Figura 8). Por otra parte, los resultados del análisis de correlación entre los años extremos (Tabla 3) y los valores mensuales de IME indicaron una influencia moderada positiva significativa de IME sobre el crecimiento radial de la especie durante el promedio mensual de enero-mayo de 1979 y 1995-2022 ($r= 0.47$; $p < 0.05$) mientras que, para 1982, 1985, 1986, 1987, 1990 y 1992 se encontró una fuerte influencia negativa no significativa de IME durante junio-diciembre sobre el crecimiento radial de la especie ($r= -0.74$; $p > 0.05$).

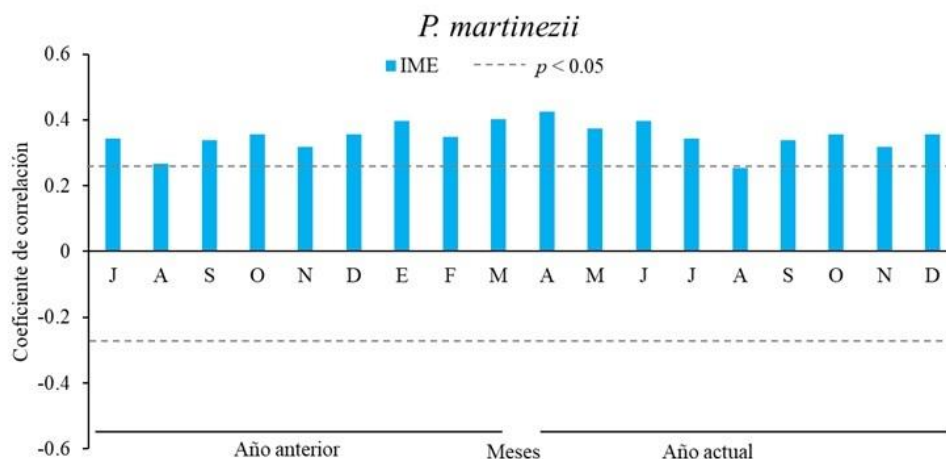


Figura 8. Coeficientes de correlación entre la cronología de *P. martinezii* y el índice IME del periodo 1979-2022.

Figure 8. Correlation coefficients between the chronology of *P. martinezii* and the IEM index for the period 1979–2022.

Tabla 3. Años registrados como eventos extremos en *P. rzedowskii* y *P. martinezii*.**Table 3.** Years recorded as extreme events in *P. rzedowskii* and *P. martinezii*.

Especie	Años (IAA < 0.9)	Años (IAA > 1.1)
<i>P. rzedowskii</i>	1987, 1990, 1991, 1995, 1997, 1999, 2000, 2008 y 2011	1992, 1993, 2010 y 2011
<i>P. martinezii</i>	1979 y 1995-2022	1982, 1985, 1986, 1987, 1990 y 1992

IAA; Índice de ancho de anillo

DISCUSIÓN

Los valores de intercorrelación entre series de 0.40 (*P. rzedowskii*) y 0.36 (*P. martinezii*) fueron mayores al umbral de 0.328 ($p < 0.01$) lo que indica que el fechado de anillos de crecimiento es estadísticamente confiable (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Los resultados de sensibilidad media de 0.20 obtenido en *P. rzedowskii* y 0.15 para *P. martinezii* son inferiores en comparación con lo reportado para *P. devoniana* (0.23) y *P. hartwegii* (0.24), ambas especies, distribuidas en Michoacán (Marlés, *et al.*, 2015; Carlón, Villanueva, D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021).

A pesar de que el suelo representa un factor determinante en las condiciones de la dinámica de crecimiento forestal (Ruíz-Ortíz, 2020), el crecimiento radial de *P. rzedowskii* y *P. martinezii* probablemente se vio influenciado por la combinación de factores como la competencia entre árboles y las prácticas silvícolas efectuadas durante el periodo de administración del bosque, lo que repercutió en la captación de la sensibilidad media de las especies evaluadas (Chadwick & Larson, 1996; Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González-Elizondo, 2018).

La variabilidad de la autocorrelación de primer orden obtenida en *P. rzedowskii* (0.31) indica que el crecimiento radial anual de la especie estuvo moderadamente influenciado por las condiciones climáticas dominantes del año previo (Fritts, 1976). Por su parte, el valor de autocorrelación de primer orden obtenida para *P. martinezii* fue muy alto (0.74), lo que indica una alta influencia de las condiciones climáticas dominantes del año previo sobre el año actual del crecimiento. Por lo que, acorde con estos resultados, *P. rzedowskii* presenta un valor aceptable de autocorrelación de primer orden, mientras que, *P. martinezii* presenta una alta correlación de primer orden que afecta su crecimiento radial anual, esto último, se considera como no deseado para realizar estudios de reconstrucción paleoclimática (Fritts, 1976; Constante, Villanueva, Cerano, Cornejo, & Valencia, 2009; Villanueva-Díaz J. , *et al.*, 2018).

La variación del primer componente principal registrada en *P. rzedowskii* (15.65%) y *P. martinezii* (45.46%) representa la señal común de crecimiento entre los árboles muestreados. Este parámetro oscila entre 0 a 100%, donde valores altos indican una mayor señal climática común en el crecimiento radial (Briffa & Jones, 1990). Acorde con estos resultados, se puede decir que *P. rzedowskii* tiene un crecimiento más heterogéneo, con una baja capacidad de registrar las variaciones climáticas.

La relación señal-ruido obtenida en *P. rzedowskii* de 1.97 y *P. martinezii* de 16.67 representan la proporción de la señal deseada con respecto a los disturbios y otros factores ajenos con el comportamiento del clima, considerados como ruido (Fritts, 1976; Villanueva-Díaz J. , *et al.*, 2018). De acuerdo con este parámetro, *P. rzedowskii* presenta una relación señal-ruido muy baja, caso contrario para *P. martinezii*, donde la relación señal-ruido de 16.67, considerada como alta, la cual pudiera deberse a la presencia de factores locales externos ajenos al clima, como la competencia entre árboles y las prácticas silvícolas realizadas en el sitio, factores que influyeron sobre el crecimiento de la especie.

Respuesta climática de las especies

Pese a que la distancia geográfica lineal entre *P. rzedowskii* y *P. martinezii* es de 235 km, se entiende que las condiciones ambientales donde crecen ambas especies son heterogéneas. Por lo tanto, los árboles de *P. rzedowskii* que se encuentran más cercanos a la costa (65 km de distancia lineal) presentan una respuesta clima-crecimiento radial distinta en comparación con los árboles

de *P. martinezii* que se localizan en un sitio más continental (300 km de distancia lineal del mar), esto se puede explicar por la presencia de barreras geográficas, específicamente, cadenas montañosas, ubicadas en la Sierra Madre del Sur, las cuales modularían mediante la convergencia friccional entre las masas de aire frío y caliente, la cantidad de humedad proveniente del Océano Pacífico (García, 1974; Manzanilla-Quñones, Aguirre-Calderon, Jiménez-Pérez, & Villanueva-Díaz, 2020) que llega a los sitios de estudio. Por lo tanto, a partir del análisis de las condiciones hidroclimáticas de los sitios de *P. rzedowskii* y *P. martinezii*, se puede afirmar que existe una diferenciación en la repuesta clima-crecimiento radial, similar con lo reportado para *P. herrerae*, *P. durangensis*, *A. durangensis*, *Cupressus lusitanica*, *P. hartwegii*, *Picea mexicana*, *Pseudotsuga menziesii* y *A. vejari*, especies que se distribuyen en un gradiente longitudinal (este-oeste) en el norte de México (Pompa-García, Camarero, & Vivar-Vivar, 2023).

Para el caso de *P. rzedowskii*, la variación de las temperaturas máxima, media y mínima de los 18 meses evaluados no influyeron sobre el crecimiento radial de la especie (1945-2015 $r < 0.28$, $p > 0.05$). La muy baja respuesta detectada entre el crecimiento radial y las temperaturas probablemente se debió a la presencia de factores ecológicos como la competencia y/o la intensidad del manejo forestal (prácticas silvícolas), los cuales influyeron en la captación de la sensibilidad climática de la especie, esto último, ha sido corroborado en un bosque de *Pinus patula* Schl. Et Cham. en Puebla (Correa-Díaz, *et al.*, 2025). Aunado a esto, la presencia de suelos fértiles, así como de las condiciones microambientales del sitio donde crecieron los árboles de *P. rzedowskii*, limitó hasta cierto punto en la formación de anillos sensibles (Fritts, 1976; Speer, 2010; Villanueva-Díaz, *et al.*, 2016; Astudillo-Sánchez, Fowler, Villanueva-Díaz, Endara-Agramont, & Soria-Díaz, 2019).

La respuesta negativa significativa del crecimiento radial de *P. rzedowskii* con la precipitación de agosto (1945-2015; $r = -0.26$; $p < 0.05$) del año anterior se debió a que el aumento en la cantidad de lluvia recibida en ese mes, limitó el crecimiento radial de la especie, por otra parte, la precipitación del año actual de crecimiento de enero ($r = 0.34$; $p < 0.05$), febrero ($r = 0.30$; $p < 0.05$) y marzo ($r = 0.28$; $p < 0.05$) de 1945-2015, al ser de baja intensidad, quedó almacenada en los primeros horizontes del suelo, para posteriormente, ser usada al inicio de la primavera, sumado a esto, la presencia de temperaturas estables influyeron en el proceso fisiológico del árbol (Biondi, Hartsough, & Galindo-Estrada, 2005).

Para el caso de *P. martinezii*, la variación de la temperatura máxima de 1953-2016 presentó una influencia negativa significativa sobre el crecimiento radial de la especie durante los 18 meses evaluados, específicamente, la influencia de los meses de febrero a mayo se considera como la más alta ($r = -0.55$; $p < 0.05$), por lo que, este periodo de influencia es similar con lo reportado por Cerano-Paredes *et al.* (2014) en *A. religiosa* del Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán durante enero-abril. Asimismo, Carlón *et al.* (2016) hallaron una respuesta negativa significativa de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca durante enero-mayo. De la misma manera, Villanueva-Díaz *et al.* (2018) encontraron una respuesta negativa significativa de la temperatura máxima de enero-junio sobre el crecimiento radial de *P. oocarpa* del Bosque la Primavera, Jalisco. Por lo tanto, se entiende que el aumento de la temperatura máxima invernal tiene un efecto negativo significativo sobre el crecimiento radial de estas especies, es decir, a mayor temperatura máxima registrada durante el invierno, menor crecimiento radial, lo que ocasiona un estrés fisiológico en el árbol, debido al incremento de la evapotranspiración y la pérdida de humedad en el suelo por el efecto de las altas temperaturas (Huang, *et al.*, 2010; Zhou, Fei, Sherry, & Luo, 2012; Carlón, Mendoza, Salicrup, Villanueva, & Lara, 2016).

Para el caso de la temperatura media y mínima, la disminución de la temperatura media durante noviembre y diciembre del año anterior y actual del crecimiento ($r = -0.17$; $p > 0.05$) junto con el aumento de la temperatura mínima del mes de diciembre ($r = 0.29$; $p < 0.05$) favoreció el crecimiento radial de *P. martinezii* durante 1953-2016. Resultados similares han sido reportados por Huante *et al.* (1991) en *A. religiosa* de la Sierra Chincua, Michoacán y por Cerano-Paredes *et al.* (2014) en *A. religiosa* del Pico de Tancitaro, Michoacán. Lo que indica que el aumento de la temperatura media invernal de diciembre-febrero favorece el crecimiento radial de estas especies, distribuidas en el centro-occidente de Michoacán.

La respuesta positiva significativa del crecimiento radial de *P. martinezii* con la precipitación de abril-diciembre del año actual de crecimiento (1953-2016; $r=0.60$; $p < 0.05$) es similar con lo reportado por Marlés et al. (2015) en *P. pseudostrobus* del oriente de Michoacán para abril. Esta respuesta del crecimiento radial de *P. martinezii* con la cantidad de precipitación registrada durante la temporada de lluvias difiere con lo reportado por la mayoría de los estudios realizados en México, los cuales señalan un patrón de respuesta entre el crecimiento radial y la precipitación estacional acumulada de noviembre-mayo, que se extiende desde el norte, centro y occidente de México (Stahle, et al., 2016; Villanueva-Díaz J. , et al., 2018; Osorio-Osorio, Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz, Soria-Díaz, & Vargas-Tristán, 2020; Carlón, Villanueva. D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021; Manzanilla-Quiñones, Aguirre-Calderón, Villanueva-Díaz, Martínez-Sifuentes, & Delgado-Valerio, 2021). Sin embargo, es importante mencionar que, al igual con lo reportado por Marles et al. (2015) en *P. pseudostrobus*, los árboles muestreados de *P. martinezii* se pueden clasificar como no potenciales para reconstrucción de precipitación acumulada, esto debido a la presencia de factores ajenos al clima que repercutieron en la captación de la señal climática.

Influencia de ENOS

A pesar de que la presencia del Niño Oscilación de Sur suele tener una influencia heterogénea contrastante sobre el crecimiento radial de las coníferas mexicanas (Villanueva-Díaz J. , et al., 2018; Astudillo-Sánchez, Fowler, Villanueva-Díaz, Endara-Agramont, & Soria-Díaz, 2019; Carlón, Villanueva. D, Soto, Mendoza, & Macías, 2021) su afectación sobre el crecimiento radial de *P. rzedowskii* fue muy baja (1979-2021; $r < 0.22$; $p > 0.05$). Resultados similares han sido reportados por Villanueva-Díaz et al. (2018) para *P. oocarpa* del Bosque la Primavera, en Jalisco. Lo que indica que la influencia de IME tiene una baja afectación en el crecimiento radial de las coníferas del centro-occidente de México, es decir, la presencia de IME no afecta de manera significativa la variabilidad hidroclimática de la región. Sin embargo, en este estudio se encontró que durante enero-junio de 1992 y 2010, se presentaron condiciones de alta humedad, producto de la influencia de la fase “La Niña”, favoreciendo el crecimiento radial de *P. rzedowskii* durante esos años. Aunado a esto, se sabe que el evento de humedad extrema registrado en 1992 se presentó desde el sur de Estados Unidos hasta el centro de México, afectando una superficie aproximada del 70% del país (Stahle, et al., 2016; Bravo, Azpra, Rodríguez, & Rodríguez, 2018). Además, el evento de 2010 correspondió a un episodio débil de “La Niña” registrado en *P. oocarpa* del occidente de México (Villanueva-Díaz J. , et al., 2018).

En el caso de *P. martinezii*, IME mostro una influencia positiva significativa sobre el crecimiento radial de la especie por los efectos de “La Niña”, específicamente, durante enero-mayo de 1979 y 1995-2022 ($r=0.47$; $p < 0.05$) donde los años 1998, 1999, 2000, 2007, 2008 y 2011 coinciden con lo reportado por Villanueva-Díaz et al. (2018) en *P. oocarpa* del centro-occidente de México, siendo estos años considerados como episodios de “La Niña”, sin embargo, la presencia de “La Niña” en el sitio tuvo un efecto dipolar sobre la influencia del crecimiento radial de la especie, donde la ausencia de condiciones húmedas y frías ocasionaron una reducción en el crecimiento radial de *P. martinezii*, es decir, lo opuesto a lo esperado para la zona centro de México (Magaña, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003). Por otra parte, la influencia de IME durante junio-diciembre de 1986 y 1987 coincide con lo reportado por Villanueva-Díaz et al. (2018) en *P. oocarpa* del centro-occidente de México, siendo estos años, considerados como episodios de “El Niño”, donde, al igual que en la fase de “La Niña”, se presentó una dipolaridad de ENSO sobre el crecimiento radial de la especie, esto provocado por el aumento en la cantidad de precipitación acumulada durante junio-diciembre y al descenso de la temperatura máxima.

CONCLUSIONES

Los árboles muestreados de *P. rzedowskii* presentan un crecimiento radial heterogéneo, con una baja capacidad para registrar las variaciones de temperatura y precipitación, así como de la influencia de ENSO, probablemente debido a la presencia de factores ecológicos ajenos al clima como el manejo forestal (prácticas silvícolas), tipo de suelo y las condiciones microambientales

del sitio, que limitaron la formación de anillos sensibles, por lo cual, los árboles analizados no son aptos para efectuar reconstrucciones paleoclimáticas.

Para el caso de los árboles muestreados de *P. martinezii*, el aumento de la temperatura máxima invernal tiene un efecto negativo significativo sobre el crecimiento radial de la especie, es decir, a mayor temperatura máxima registrada durante el invierno, menor crecimiento radial, lo que ocasiona un estrés fisiológico en el árbol, debido al incremento de la evapotranspiración y la pérdida de humedad en el suelo por el efecto de las altas temperaturas.

Se presentó una dipolaridad de ENSO sobre el crecimiento radial de *P. martinezii*, donde episodios de “El Niño” provocaron un aumento en la precipitación acumulada de junio-diciembre, así como un descenso de la temperatura máxima de ese periodo, mientras que los episodios de “La Niña” ocasionaron condiciones secas y cálidas durante enero-mayo.

Esta dicotomía hallada en *P. rzedowskii* y *P. martinezii* sobre sus distintas respuestas climáticas y oceánicas es fundamental para planear futuras estrategias de manejo y conservación de ambas especies, las cuales presentan poblaciones pequeñas, fragmentadas y aisladas en Michoacán.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de beca de Estancia Posdoctoral (EPM 2022-2025) otorgada al primer autor. A la Coordinación de la Investigación Científica CIC de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Proyecto número 16976) de PDV. A la Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por las facilidades brindadas durante el desarrollo de esta investigación. A la familia Zapién y a las autoridades de la Comunidad del Varaloso de Coalcomán, Michoacán, por el apoyo durante la toma de datos en campo.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An update review of dendrochronological investigation in Mexico, a megadiverse country with a high potential for tree-ring sciences. *Forests*, 8, 160. 10.3390/f8050160.
- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., & Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming. *Trees*, 33, 1087-1100. 10.1007/s00468-019-01844-3.
- Biodiversidad Mexicana. (15 de 6 de 2024). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Obtenido de Biodiversidad Mexicana: https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees.html?fbclid=IwY2xjawMVyXBleHRuA2FlbQIxMQABHsIOCBSD7r3tW9DLAE3S12dCRwjN4SRdpJRRJjKLg2O27SRzytrFfooBARwj_aem_9F-XIPhU5X4HcYXAtelA
- Biondi, F., & Waikul, K. (2004). DendroClim2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30(3), 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>.
- Biondi, F., Hartsough, P. C., & Galindo-Estrada, I. (2005). Daily weather and tree growth at tropical treeline of North America. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 6-24. 10.1657/1523-0430(2005)037[0016:dwtga]2.0.co;2 .

- Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1990). Basic chronology statistics and assessment. In E. R. Cook, & L. A. Kairiukstis, *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences* (pp. 137-152). Boston, USA: Academic Publishers.
- Carlón, A. T., Mendoza, M. E., Salicrup, D. R., Villanueva, D. J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.002>.
- Carlón, A. T., Villanueva, D. J., Soto, C. G., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120(5), 106920. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>.
- Carlón-Allende, T., De la Peña, K. A., Villanueva-Díaz, J., & Macías-Vázquez, J. L. (2025). Dendrochronological research in Mexico: A bibliometric analysis. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24037. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.09.037>.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Trucios-Caciano, R., & Guerra de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41-54. <https://doi.org/10.14350/rig.35190>.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Magaña-Rueda, V. O., Constante-García, V., . . . Váldez-Zepeda, D. (2019). Climatic influence on fire regime (1700 to 2008) in the Nazas watershed, Durango, Mexico. *Fire Ecology*, 15(9), 1-14. 10.1186/s42408-018-0020-x.
- Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., . . . Castruita-Esparza, L. U. (2019). Historical bark beetle outbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1895-2015) and their relationship with droughts. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 269-290. 10.5154/r.rchscfa.2019.01.006.
- Chadwick, D., & Larson, B. A. (1996). *Forest Stand Dynamics*. New York, USA: Wiley.
- CICESE. (2024, 01 15). *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*. Retrieved from <http://clicom.mex.cicese.mx/>
- Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. (2019).
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo, O. E., & Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 34(1), 17-39.
- Contreras-Bailón, R., Delgado, V. P., Moreno-Letelier, A., Piñero, D., Manzanilla-Quiñones, U., Saénz-Romero, C., & Molina-Sánchez, A. (2025). Genetic and ecological divergence of *Pinus durangensis* and *Pinus martinezii*: two endemic lineages with contrasting evolutionary histories. *International Journal of Plants Sciences*, 186(4), 247-260. <https://doi.org/10.1086/734477>.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree Ring Bulletin*, 47: 37-59.
- Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Gutiérrez-García, J. V., Velasco-Bautista, E., Moreno-Sánchez, F., & Zamora-Morales, B. P. (2025). Efecto del clima y el manejo forestal en el crecimiento radial de un bosque de coníferas en Puebla, México. *Madera y Bosques*, 31, e312717. 10.21829/myb.2025.312717.
- Cuervo-Robayo, A., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>.
- De la Peña, K. A., Mendoza, M. E., Carlón-Allende, T., Macías-Vázquez, J. L., & Villanueva-Díaz, J. (2024). Dendrogeomorphological analysis of a debris flow in the Monarch

- Butterfly Biosphere Reserve, central Mexico. *Natural Hazards*, 121(2), 1575–1598. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06873-x>.
- Delgado, V. P., Pinero, D., Chaos, A., Pérez, N., & Álvarez, E. R. (1999). High population differentiation and genetic variation in the endangered Mexican pine *Pinus rzedowskii* (Pinaceae). *American Journal of Botany*, 86, 669-676. <https://doi.org/10.2307/2656576>.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. London: Academic Press.
- Gernandt, D., & Pérez de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: S126-S133. <http://dx.doi.org/10.7550/rmb.32195>.
- González-Casares, M., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). Differences in Climate-growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pin species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees*, 31, 531-544. [10.1007/s00468-016-1488-0](https://doi.org/10.1007/s00468-016-1488-0).
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating cross dating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- Holmes, R. L. (1983). Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Huang, J., Tardif, J. C., Bergeron, Y., Denneker, B., Berninger, F., & Girardin, M. P. (2010). Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology*, 16, 711-731. [10.1111/j.1365-2486.2009.01990.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01990.x).
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 15-28.
- INEGI. (2014, 7 15). Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Escala 1:250 000. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. (2021, 7 15). Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII (capa unión). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Villanueva-Díaz, J., Martínez-Sifuentes, A. R., & Delgado-Valerio, P. (2021). Anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* como indicadores de fluctuaciones climáticas y de la influencia de fenómenos océano-atmósfera en la Faja Volcánica Transmexicana. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732276. [10.21829/myb.2021.2732276](https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732276).
- Manzanilla-Quñones, U., Delgado-Valerio, P., & Molina-Sánchez, A. (2024). Aplicaciones de la dendrocronología en los ecosistemas forestales de México. *Desde el Herbario*, 268-273.
- Marlés, M. J., Valor, I. T., Claramunt, L. B., Maneja, Z. R., Pérez, S. D., Sánchez, M. S., & Boada, J. M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88, 19-32. <https://doi.org/10.14350/rig.43338>.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. D. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421569. [10.21829/myb.2018.2421569](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569).
- NOAA. (2024, 1 15). *National Oceanic Administration Agency*. Retrieved from Dataset Useful for ENSO Research: <https://psl.noaa.gov/enso/data.html>
- Osorio-Osorio, J. A., Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Soria-Díaz, L., & Vargas-Tristán, V. (2020). Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México mediante anillos de crecimiento en *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae). *Revista de Biología Tropical*, 68(3), 818-832.
- Perry, J. (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Oregon: Timber Press.
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A Microcomputer based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59-64. <http://hdl.handle.net/10150/260443>.
- Ruiz-Ortiz, C. H. (2020). Influencia del tipo de suelo sobre el crecimiento diamétrico anual de *Juglans neotropica* Diels y *Eriotheca ruizii* (K. Schum.) A. Robyns en los sectores del

Recibido:
24/agosto/2025

Aceptado:
19/diciembre/2025

- Parque Universitario Francisco Vivar Castro y la Reserva El Chilco, al sur de Ecuador.* Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja.
- Schulz, E. F. (1976). En E. F. Schulz, *Elementary statistical properties* (págs. 31-73). Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Semarnat. (2010). *Norma oficial mexicana NOM-059*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree ring research*. Tucson, Arizona, USA: University of Arizona Press.
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D., Villanueva, D. J., Cerano, J. P., & Griffin, J. M. (2016). The Mexican drought atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, (149), 34-60. 10.1016/j.quascirev.2016.06.018.
- Vázquez-Selem, L., Franco-Ramos, O., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., & Stahle, D. W. (2025). Climatic response of *Juniperus monticola* Martínez, a multi-century alpine shrub from the high mountains of central Mexico. *The Holocene*, 35(1), 100-110. <https://doi.org/10.1177/09596836241286006>.
- Vejpustková, M., & Čihák, T. (2019). Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*, 10(2), 97. <https://doi.org/10.3390/F10020097>.
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. J., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), e2411464. 10.21829/myb.2018.241464.
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, J., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. J., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), e2411464. 10.21829/myb.2018.241464.
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 3(2), 175-185.
- Yang, M., Yu, Y., Zhang, H., Wang, Q., Gan, M., & Yu, R. (2020). Tree ring based drought variability in Northwest Tajikistan since 1895 AD. *Journal of Arid Land*, 12(3), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0062-1>.
- Yang, M., Yu, Y., Zhang, H., Wang, Q., Gan, M., & Yu, R. (2020). Tree ring based drought variability in Northwest Tajikistan since 1895 AD. *Journal of Arid Land*, 12(3), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0062-1>.
- Yang, M., Yu, Y., Zhang, H., Wang, Q., Gan, M., & Yu, R. (2020). Tree ring based drought variability in Northwest Tajikistan since 1895 AD. *Journal of Arid Land*, 12(3), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0062-1>.
- Yang, M., Yu, Y., Zhang, H., Wang, Q., Gan, M., & Yu, R. (2020). Tree ring based drought variability in Northwest Tajikistan since 1895 AD. *Journal of Arid Land*, 12(3), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0062-1>.
- Zhou, X. H., Fei, S. F., Sherry, R., & Luo, Y. Q. (2012). Root biomass dynamics under experimental warming and doubled precipitation in a tallgrass prairie. *Ecosystems*, 15, 542-554. 10.1007/s10021-012-9525-3.