

Relationship between climate variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero

Relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de *Pinus montezumae* Lamb. en Coyuca de Catalán, Guerrero

Otoniel Cortés-Cortés¹; Eladio H. Cornejo-Oviedo¹; Julián Cerano-Paredes^{2*}; Rosalinda Cervantes-Martínez²; Celestino Flores-López¹; Salvador Valencia-Manzo¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Ingeniería Forestal. Calzada Antonio Narro núm. 1923. C. P. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila.

²INIFAP CENID-RASPA. km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

*Corresponding author: cerano.julian@gmail.com; tel.: +52 (871) 159 0104.

Abstract

Introduction: Understanding the dendroclimatic potential of a species allows us to reconstruct the climate variability in the latitudes and altitudes of its distribution.

Objective: To determine the potential of *Pinus montezumae* Lamb. to reconstruct climatic variables.

Materials and methods: A total of 80 samples were extracted with a Pressler increment borer and dated, allowing growth rates to be generated. Average monthly rainfall and minimum and maximum temperature were obtained, and a response function analysis between growth rates and climate data was conducted.

Results and discussion: Dated samples represented 75 % of the total. The COFECHA program indicated a correlation between series of $r = 0.57$ ($P < 0.01$) and a mean sensitivity of 0.31; *P. montezumae* is sufficiently sensitive to record climate variability. Three chronologies (standard, residual and arstan) covering 228 years (1790-2017) were generated for each of the three growth rates (total ring, early and latewood). The response function analysis showed that it is possible to reconstruct the spring rainfall and the May-July maximum temperature based on the total ring ($r = 0.66$; $P < 0.01$) and latewood ($r = 0.35$; $P < 0.01$) indices, respectively.

Conclusion: Statistical parameters indicate that *P. montezumae* is an adequate proxy source for climate variability reconstruction studies.

Resumen

Introducción: El conocimiento del potencial dendroclimático de una especie permite reconstruir la variabilidad climática en las latitudes y altitudes de su distribución.

Objetivo: Determinar el potencial de *Pinus montezumae* Lamb. para reconstruir variables climáticas.

Materiales y métodos: Se extrajeron 80 muestras con taladro de Pressler, se dataron y generaron índices de crecimiento. Se obtuvieron promedios de precipitación mensual, temperatura mínima y máxima, y se corrió un análisis de función de respuesta entre los índices de crecimiento y los datos climáticos.

Resultados y discusión: Las muestras fechadas representaron 75 % del total. El programa COFECHA indicó una correlación entre series de $r = 0.57$ ($P < 0.01$) y una sensibilidad media de 0.31; la especie es sensible para registrar la variabilidad climática. Se generaron tres cronologías (estándar, residual y arstan) de 228 años (1790-2017) para cada uno de los tres índices de crecimiento (anillo total, madera temprana y tardía). El análisis de función de respuesta mostró que es posible reconstruir la precipitación de primavera y la temperatura máxima de mayo-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.

Conclusión: Los parámetros estadísticos indican que *P. montezumae* es una fuente *proxy* apropiada para estudios de reconstrucción de la variabilidad climática.

Keywords:

Dendroclimatology; growth ring; climate variability; rainfall; temperature.

Palabras clave:

Dendroclimatología; anillo de crecimiento; variabilidad climática; precipitación; temperatura.

Introduction

The formation of new growth cells in a conifer stem takes place in the vascular cambium located between the bark and sapwood. The cambium is responsible for forming, during the growing season, annual growth rings (Plomion, Leprovost, & Stokes, 2001). There are two colored bands in an annual ring: one light and the other dark, composed of cells of a different size, thickness and density denominated and differentiated, respectively, as earlywood (big cells with a thin cellular wall and light color) and latewood (cells of a smaller diameter and a thick cellular wall with dark color) (León-Hernández & Espinoza-de Pernía, 2001).

The formation of the annual ring is influenced by endogenous and exogenous factors; precipitation, temperature and photoperiod, among others, are recognized as exogenous factors (Plomion et al., 2001). The influence of these factors and their variation determine the formation of early and latewood; the former occurs in the growing season from spring to summer, and the latter from autumn to winter (León-Hernández & Espinoza-de Pernía, 2001). Given the annual variations in precipitation and air temperature, it is possible to obtain and analyze climate information from annual rings using dendrochronological techniques and methods (Gutiérrez-Merino, 2009).

In Mexico, interest in dendrochronological studies has increased in recent years. The biological richness of the country generates a wide work field to develop such studies, covering species from arid and semi-arid climates, temperate and tropical forests, and riparian and mountainous habitats across the country (Villanueva, Fulé, Cerano, Estrada, & Sánchez, 2009). As a result, differences have been found in the response of tree growth to climate variability in northern, central, and southern sites in Mexico (Therrell, Stahle, Cleveland, & Villanueva-Díaz, 2002). For northern and some central sites, growth responds to winter-spring precipitation and minimum winter temperatures (Cerano-Paredes et al., 2009, 2013, 2014; Chávez-Gándara et al., 2017; Constante-García, Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, Cornejo-Oviedo, & Valencia-Manzo, 2009), whereas for southern sites, responses to spring rainfall and minimum temperatures have been reported (Huante, Rincón, & Swetnam, 1991; López-Hernández et al., 2018).

The number of species for which dendrochronological potential has been determined has increased; however, in Mexico many species remain unanalyzed. One example of this is *Pinus montezumae* Lamb. which has a wide distribution, from the highest parts of the Sierra Madre Oriental to the Transvolcanic Belt, reaching an altitudinal range from 1500 to 2800 m (Rzedowski, 2006). This species is distributed from

Introducción

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, Leprovost, & Stokes, 2001). En un anillo anual se observan dos bandas, una 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 & Espinoza-de Pernía, 2001).

En la formación del anillo anual influyen factores endógenos y exógenos; se reconoce a la precipitación, la temperatura y el fotoperiodo, entre otros, como factores 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 & Espinoza-de Pernía, 2001). 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-Merino, 2009).

En México, el interés por estudios dendrocronológicos ha crecido en los últimos años. 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, Fulé, Cerano, Estrada, & Sánchez, 2009). Como resultado se han determinado diferencias en la respuesta del crecimiento de los árboles a la variabilidad climática en sitios del norte, centro y sur del país (Therrell, Stahle, Cleveland, & Villanueva-Díaz, 2002). Para el norte y algunos sitios del centro, el crecimiento responde a la precipitación invierno-primavera y a las temperaturas mínimas de invierno (Cerano-Paredes et al., 2009, 2013, 2014; Chávez-Gándara et al., 2017; Constante-García, Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, Cornejo-Oviedo, & Valencia-Manzo, 2009), mientras que para el sur, se han reportado respuestas a la precipitación del periodo de primavera y a la temperatura mínima (Huante, Rincón, & Swetnam, 1991; López-Hernández et al., 2018).

El número de especies para las cuales se ha determinado el potencial dendrocronológico ha aumentado; sin embargo, en México faltan muchas especies por analizar. Un ejemplo es *Pinus montezumae* Lamb. que tiene amplia distribución, desde las partes más altas

northeast to southeast at elevations ranging from 300 to 3000 m (Fonseca, 2013; Rzedowski, 2006). Despite the wide distribution of the species, there are no studies addressing the dendroclimatic potential of its annual growth. This species represents an alternative to develop a network of chronology that enables the analysis of climate variability, at local and regional geographic scales. For that reason, the aim of this paper was to determine the potential of *P. montezumae* to reconstruct climatic variables. In order to do this, we dated the annual growth of *P. montezumae* and developed total ring, early and latewood chronologies; we also determined the relationship between growth and climatic variables (precipitation, maximum and minimum temperature) and the species' potential to reconstruct them.

Materials and methods

Study area

This study was conducted in the Sierra Madre del Sur, which spans from northwestern to southeastern Mexico (Rzedowski, 2006), specifically in the San Antonio Texas Ejido, Coyuca de Catalán, Guerrero, between coordinates 17° 39' 51.56" to 17° 46' 44.36" N and 100° 51' 33.46" to 100° 50' 34.34" W, within the sub-basin of the Cuitzio River, at an elevation between 1 500 and 2 800 m (Figure 1a). Pine-oak forests can be found in the area, as well as secondary vegetation of pine-oak forests and some patches of tropical mountain cloud forest (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016). The main climate type is semi-warm sub-humid with average annual temperature of 18-22 °C and average annual rainfall of 1400 mm (García, 2004) (Figure 1b). The soils are mainly chromic Cambisol and eutric Regosol (INEGI, 2014).

Sampling

Based on a selective sampling, we considered the individuals with the longest life span, without physical damage and located on hillsides under dry or more stressful conditions. Eighty samples (growth cores) from 34 live *P. montezumae* trees were extracted using a 5 mm diameter Pressler increment borer. Each sample was placed in plastic straws with holes in them for protection and to facilitate ventilation, thereby preventing fungal growth. The identification and location data of each sample were recorded on the straws and in a field notebook.

Sample preparation and growth measurement

In the laboratory, the samples were mounted and glued to wood moldings, ensuring that the tracheids were

de la Sierra Madre Oriental hasta el Eje Neovolcánico Transversal, cubriendo un rango altitudinal de 1500 a 2800 m (Rzedowski, 2006). La especie se distribuye desde el noreste hasta el sureste en altitudes de 300 a 3000 m (Fonseca, 2013; Rzedowski, 2006). Pese a su amplia distribución, no existe un estudio que haya analizado el potencial dendroclimático de los crecimientos anuales. Dicha especie representa una alternativa para desarrollar una red de cronologías que permita analizar la variabilidad climática, a escala geográfica local y regional. Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo fue determinar el potencial de *P. montezumae* para reconstruir variables climáticas. Para ello, se dataron los crecimientos anuales de *P. montezumae* y se desarrollaron cronologías de anillo total, madera temprana y tardía; se determinó la relación entre el crecimiento y las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima) y el potencial de la especie para reconstruirlas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en la Sierra Madre del Sur, la cual se extiende del noroeste al sureste de México (Rzedowski, 2006) en el ejido San Antonio Texas, Coyuca de Catalán, Guerrero, entre las coordenadas 17° 39' 51.56" a 17° 46' 44.36" LN y 100° 51' 33.46" a 100° 50' 34.34" LO, dentro de la subcuenca Río Cuitzio, a una altitud entre 1500 y 2800 m (Figura 1a). En el área se desarrollan bosques de pino-encino, así como vegetación secundaria de bosques de pino-encino y algunos manchones de bosque mesófilo de montaña (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016). El principal tipo de clima es semicálido subhúmedo con temperatura media anual de 18 a 22 °C y precipitación media anual de 1 400 mm (García, 2004) (Figura 1b). Los suelos son Cambisol crómico y Regosol éutrico, principalmente (INEGI, 2014).

Toma de muestras

Con base en un muestreo selectivo se consideraron los individuos más longevos, sin daños físicos y ubicados en laderas con condiciones secas o de mayor estrés. Ochenta muestras (virutas o núcleos de crecimiento) de 34 árboles vivos de *P. montezumae* se extrajeron con un taladro de Pressler de 5 mm de diámetro. Cada muestra se colocó en popotes de plástico con orificios, como protección y para facilitar la ventilación, con lo cual se evita la formación de hongos. Los datos de identificación y ubicación de cada muestra se registraron sobre los popotes y en cuaderno de campo.

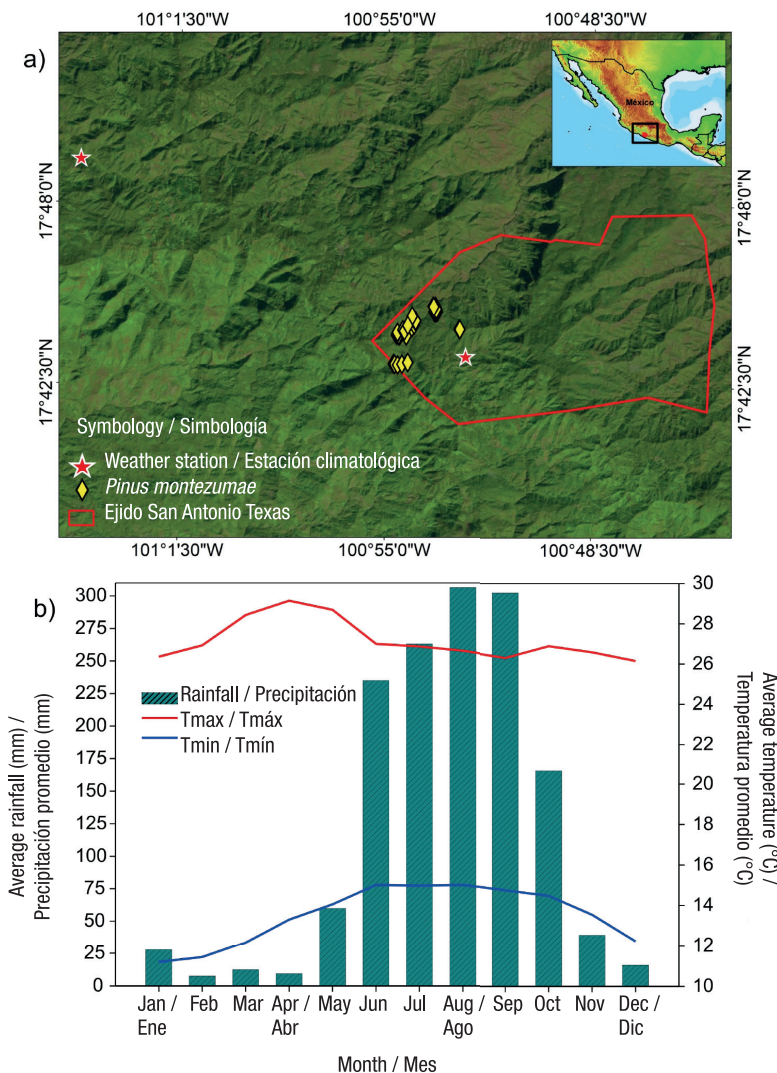


Figure 1. (a) Geographic location of the study area, distribution of sampling points and weather stations used, and (b) climograph of the San Antonio Texas study region, Coyuca de Catalán, Guerrero.

Figura 1. (a) Ubicación geográfica del área de estudio, distribución de los puntos de muestreo y las estaciones climatológicas empleadas y (b) climograma para la región de estudio San Antonio Texas, Coyuca de Catalán, Guerrero.

perpendicular to the annual increments. After that, the samples were polished using sandpaper of various grit sizes (120 to 1200) to facilitate the visibility of the annual growths under a stereoscope. Based on standard dendrochronological techniques, the annual rings of each sample were counted and dated to the exact year of their formation. During this process, characteristic growth patterns among the samples (wide and narrow rings), false rings and missing rings were identified, starting with the youngest samples and then the oldest (Stokes & Smiley, 1968).

The measurement of total annual growth and early and latewood was made with a Velmex measurement system with a precision of 0.001 mm, connected to a computer and using Measure J2X software (VoorTech, 2007); also, a stereoscope with a scaled grid was used

Preparación de muestras y medición de crecimiento

En laboratorio, las muestras fueron montadas y adheridas con pegamento a molduras de madera, cuidando que las traqueidas quedaran en posición perpendicular a los incrementos anuales. Posteriormente, las muestras se pulieron con lijas de diferente granulado (120 a 1200) para facilitar la visibilidad de los crecimientos anuales bajo estereoscopio. Con base en técnicas dendrocronológicas estándar, los anillos anuales de cada muestra se contaron y fecharon al año exacto de su formación. Durante este proceso se identificaron patrones de crecimiento característicos entre las muestras (anillos anchos y angostos), anillos falsos y anillos perdidos, comenzando con las muestras de menor edad y, posteriormente, las de mayor edad (Stokes & Smiley, 1968).

to ease the delimitation between rings and the two portions of wood (early and latewood).

Analysis of the dating and generation of chronologies

The dating of total ring and early and latewood was statistically evaluated with the COFECHA program (Holmes, 1983). This program correlates the series in 50-year segments with 25-year overlaps, by comparing each individual series with all the samples and the average series. This procedure identifies errors in the dating, attributed to the formation of false rings or to the non-formation of rings (absent rings) in specific years (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

Three chronologies (standard, residual and arstan) were then generated in ARSTAN software (Cook, 1987). We applied the best fitting curve to each growth series, standardized them, eliminated the noise due to non-climate factors such as the growth effect due to age, fire damage, physical impacts or any biological effect, and maximized the variance from environmental factors. The growth rate for each year was obtained by dividing the ring width value by the corresponding curve value (Cook, 1987; Gutiérrez-Merino, 2009).

Climate-growth relationship

To determine the dendroclimatic potential of *P. montezumae*, a response function analysis was conducted, for which the climatic variables (monthly rainfall and maximum and minimum temperature averages) were related to growth rates. The climate data were downloaded from the National Water Commission (CONAGUA, 2019).

This study considered five of the weather stations nearest to the San Antonio Texas Ejido (Table 1), two of which (San Antonio Texas and Río Frío) were best related to ring width chronologies (Figure 1a). From these, regional averages covering the 1962-2017 period were obtained for minimum and maximum temperatures, whereas for rainfall, the 1962-1985

La medición del crecimiento anual total, madera temprana y tardía se hizo con un sistema de medición Velmex con precisión de 0.001 mm, conectado a una computadora y empleando el *software* Measure J2X (VoorTech, 2007); asimismo, se empleó un estereoscopio con retícula graduada, para facilitar la delimitación entre anillos y las dos porciones de madera (madera temprana y tardía).

Análisis del fechado y generación de cronologías

El fechado del anillo total, madera temprana y madera tardía se evaluó estadísticamente con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Este programa correlaciona las series en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, comparando cada serie individual con todas las muestras y la serie promedio; con este procedimiento se identifican errores en el fechado, atribuidos a la formación de anillos falsos o a la no formación (anillos ausentes) en años particulares (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

Posteriormente, en el *software* ARSTAN (Cook, 1987) se generaron tres cronologías (estándar, residual y arstan). Se aplicó la mejor curva de ajuste a cada serie de crecimiento, se estandarizaron y se eliminó el ruido por factores externos al clima como el efecto del crecimiento por la edad, daños por incendios, golpes o cualquier efecto biológico y se maximizó la varianza debida a factores ambientales. Al dividir el valor del ancho de anillo entre el valor correspondiente de la curva, se obtuvo el índice de crecimiento para cada año (Cook, 1987; Gutiérrez-Merino, 2009).

Relación clima-crecimiento

Para determinar el potencial dendroclimático de *P. montezumae* se corrió un análisis de función de respuesta, para lo cual, las variables climáticas (promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima) se relacionaron con los índices de crecimiento. Los datos climáticos se descargaron de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019).

Table 1. Nearest weather stations to the San Antonio Texas Ejido, Coyuca de Catalán, Guerrero.

Cuadro 1. Estaciones climatológicas más cercanas al ejido de San Antonio Texas, Coyuca de Catalán, Guerrero.

Code/ Clave	Station/ Estación	Latitude (N)/ Latitud (N)	Longitude (W)/ Longitud (O)	Altitude (m)/ Altitud (m)	Period/ Periodo
12140	San Antonio Texas	17.723585	-100.875003	1870	1962-2016
12054	Río Frío	17.822427	-101.077011	1590	1968-2017
12034	El Camalote	17.722596	-101.211128	500	1963-2017
12017	Santa Rita	17.972628	-100.869265	1380	1977-1996
12017	Casas Viejas	17.584573	-101.006122	500	1969-2017

period was analyzed, because rainfall data were inconsistent from 1986 to the present, and the correlations decreased significantly. Both the months with the highest correlation and the seasonal period that most influences the growth of *P. montezumae* were defined for each variable. Finally, simple linear regression models were run in STATISTICA version 5.5 software (StatSoft Inc., 2000), with the growth rates as the independent variable and the climatic variables as the dependent variable. This made it possible to determine the series that best explain the interannual variability and to consider them as a climate proxy.

Results and discussion

Sample dating

We were able to date 75 % of the 80 samples; the remaining ones (25 %) were discarded because had low correlations between growth patterns, due to the presence of false rings. Studies carried out on other conifers in central (Cerano-Paredes et al., 2014; Villanueva-Díaz et al., 2016) and southern Mexico (López-Hernández et al., 2018) report lower values (43 to 66 %); considering the above, the percentage of dated samples in the present study is high.

The correlation between series was significantly high ($r = 0.57$; $P < 0.01$) and exceeds the significant minimum ($r = 0.3281$; $P < 0.01$) established by COFECHA (Holmes, 1983); mean sensitivity was 0.31. These statistical values, for dendrochronological purposes, are adequate and within the intervals reported for other species from central (Cerano-Paredes et al., 2014; Villanueva-Díaz et al., 2016, 2018) and southern Mexico (López-Hernández et al., 2018) considered with good dendrochronological potential. The comparison is shown in Table 2.

Chronology development

Figure 2 shows the generated chronology covering 228 years (1790-2017), with a first order autocorrelation of 0.33 and a signal-to-noise ratio of 15.05. Studies conducted on species growing in sites with similar climatic conditions and altitudes, in central and southern Mexico, report similar or lower statistics (Table 2).

A species with good dendrochronological potential should have high intercorrelation between series (values are generally between 0.55 and 0.75), high mean sensitivity (0.65 in very sensitive species and up to 0.15 in species with low sensitivity), high signal-to-noise ratio, and low first order autocorrelation (Constante-García, Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, & Estrada-Ávalos, 2010). Based on these results, it can be said that *P. montezumae* has adequate dendrochronological potential.

En este estudio se consideraron cinco de las estaciones meteorológicas más cercanas al ejido san Antonio Texas (Cuadro 1), de las cuales, dos (San Antonio Texas y Río Frío) se relacionaron mejor con las cronologías de ancho de anillo (Figura 1a). De estas se obtuvieron promedios regionales que comprenden el periodo 1962-2017 para las temperaturas mínimas y máximas, mientras que, para la precipitación, se empleó el periodo 1962-1985, ya que los datos de precipitación fueron inconsistentes de 1986 a la fecha y las correlaciones disminuían significativamente. Para cada variable se definieron los meses con mayor correlación y el periodo estacional que más influye en el crecimiento de *P. montezumae*. Finalmente, los modelos de regresión lineal simple se corrieron en el programa STATISTICA versión 5.5 (StatSoft Inc., 2000), tomando los índices de crecimiento como variable independiente y las variables climáticas como variable dependiente. Esto permitió determinar las series que mejor explican la variabilidad interanual y considerarlas como *proxy* del clima.

Resultados y discusión

Fechado de muestras

De un total de 80 muestras se logró fechar 75 %; las restantes (25 %) se descartaron por presentar correlaciones bajas entre los patrones de crecimiento, debido a la presencia de anillos falsos. Estudios realizados para otras coníferas en el centro (Cerano-Paredes et al., 2014; Villanueva-Díaz et al., 2016) y sur de México (López-Hernández et al., 2018) reportan valores más bajos (43 a 66 %); considerando lo anterior, el porcentaje de muestras fechadas en el presente estudio es alto.

La correlación entre series fue significativamente alta ($r = 0.57$; $P < 0.01$) y supera al mínimo significativo ($r = 0.3281$; $P < 0.01$) establecido por COFECHA (Holmes, 1983); la sensibilidad media fue 0.31. Dichos valores estadísticos, para fines dendrocronológicos, son adecuados y se encuentran en el intervalo reportado para otras especies del centro (Cerano-Paredes et al., 2014; Villanueva-Díaz et al., 2016, 2018) y sur de México (López-Hernández et al., 2018) consideradas con buen potencial dendrocronológico. La comparación se muestra en el Cuadro 2.

Desarrollo de la cronología

La Figura 2 ilustra la cronología generada que comprende una longitud de 228 años (1790-2017) con una autocorrelación de primer orden de 0.33 y una proporción señal-ruido de 15.05. Estudios realizados en especies que crecen en sitios con condiciones climáticas y altitudes similares, en el centro y sur de México, reportan estadísticos cercanos o inferiores (Cuadro 2).

Table 2. Comparison of the statistical parameters of three species and this study's results.**Cuadro 2. Comparación de los parámetros estadísticos de tres especies con los resultados del presente trabajo.**

Species/Especie	Author/Autor	r	MS/SM	1°	SN/SR
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham.	Cerano-Paredes et al. (2014)	0.47	0.37		
<i>Juniperus monticola</i> Martínez	Villanueva-Díaz et al. (2016)	0.55	0.41	0.46	1.23
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	López-Hernández et al. (2018)	0.50	0.28		
	Villanueva-Díaz et al. (2018)	0.50	0.32	0.10	6.96
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	Current study/Estudio actual	0.57	0.31	0.33	15.05

Correlation between series (r), mean sensibility (MS), first order autocorrelation (1°) and signal-to-noise ratio (SN).

Correlación entre series (r), sensibilidad media (SM), autocorrelación de primer orden (1°) y proporción señal-ruido (SR).

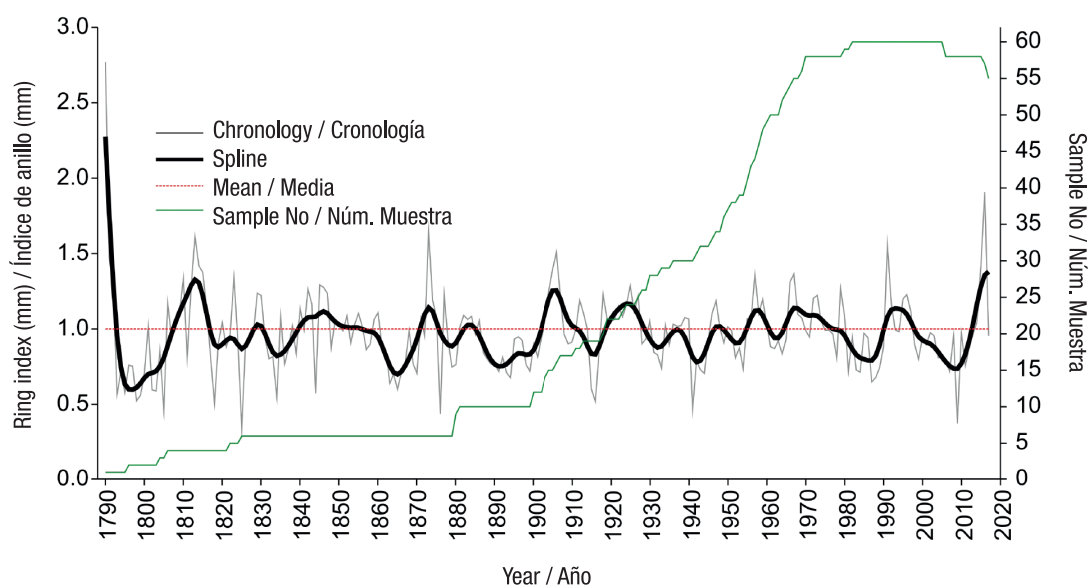


Figure 2. Total ring chronology of *Pinus montezumae* for the San Antonio Texas Ejido, Coyuca de Catalán, Guerrero, in the 1790-2017 period (228 years). Annual variability is represented by the grey line, and the 10-year spline by the black one.

Figura 2. Cronología de anillo total de *Pinus montezumae* para el ejido San Antonio Texas, Coyuca de Catalán, Guerrero, en el periodo 1790 a 2017 (228 años). La variabilidad anual se indica con la línea gris y el spline de 10 años en color negro.

Growth response to rainfall

Figure 3 shows the correlation between monthly precipitation and *P. montezumae* growth indices. The total ring and earlywood indices of the standard and arstan chronologies showed responses similar to monthly precipitation. The correlations were positive with January, March, April, May, June, September and December, and negative with February, July, August, October and November. The positive correlations were significant ($P < 0.05$) for April and May, and the negative ones were significant ($P < 0.05$) for February and November. Regarding the residual chronology, total ring and earlywood indices showed a significant positive correlation ($P < 0.05$) with April rainfall only

Una especie con buen potencial dendrocronológico debe presentar alta intercorrelación entre series (en general, los valores están entre 0.55 y 0.75), alta sensibilidad media (0.65 en especies muy sensibles y hasta 0.15 en especies poco sensibles), alta relación señal ruido y baja autocorrelación de primer orden (Constante-García, Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, & Estrada-Ávalos, 2010). Con base en estos resultados se puede considerar que *P. montezumae* tiene potencial dendrocronológico adecuado.

Respuesta del crecimiento a la precipitación

La Figura 3 muestra la correlación de la precipitación mensual con los índices de crecimiento de *P. montezumae*.

and a significant negative correlation with February and November rainfall ($P < 0.05$).

Regarding the latewood index, the standard and arstan chronologies indicated positive correlations with rainfall in January, March to October, and December; May, June and September had significant correlations ($P < 0.05$). Conversely, the correlations were negative and not significant ($P < 0.05$) for February and November. The residual chronology had a positive correlation from March to July and in September, which was significant ($P < 0.05$) only in May. In this chronology, the negative correlation was significant ($P < 0.05$) in November.

El índice de anillo total y madera temprana de las cronologías estándar y arstan presentaron respuestas similares a la precipitación mensual. Las correlaciones fueron positivas con los meses de enero, marzo, abril, mayo, junio, septiembre y diciembre; y negativas con febrero, julio, agosto, octubre y noviembre. Las correlaciones positivas fueron significativas ($P < 0.05$) para los meses de abril y mayo, y negativas significativas ($P < 0.05$) para febrero y noviembre. Con respecto a la cronología residual, los índices de anillo total y madera temprana mostraron correlación positiva significativa ($P < 0.05$) con la precipitación de abril únicamente y negativa significativa con la de febrero y noviembre ($P < 0.05$).

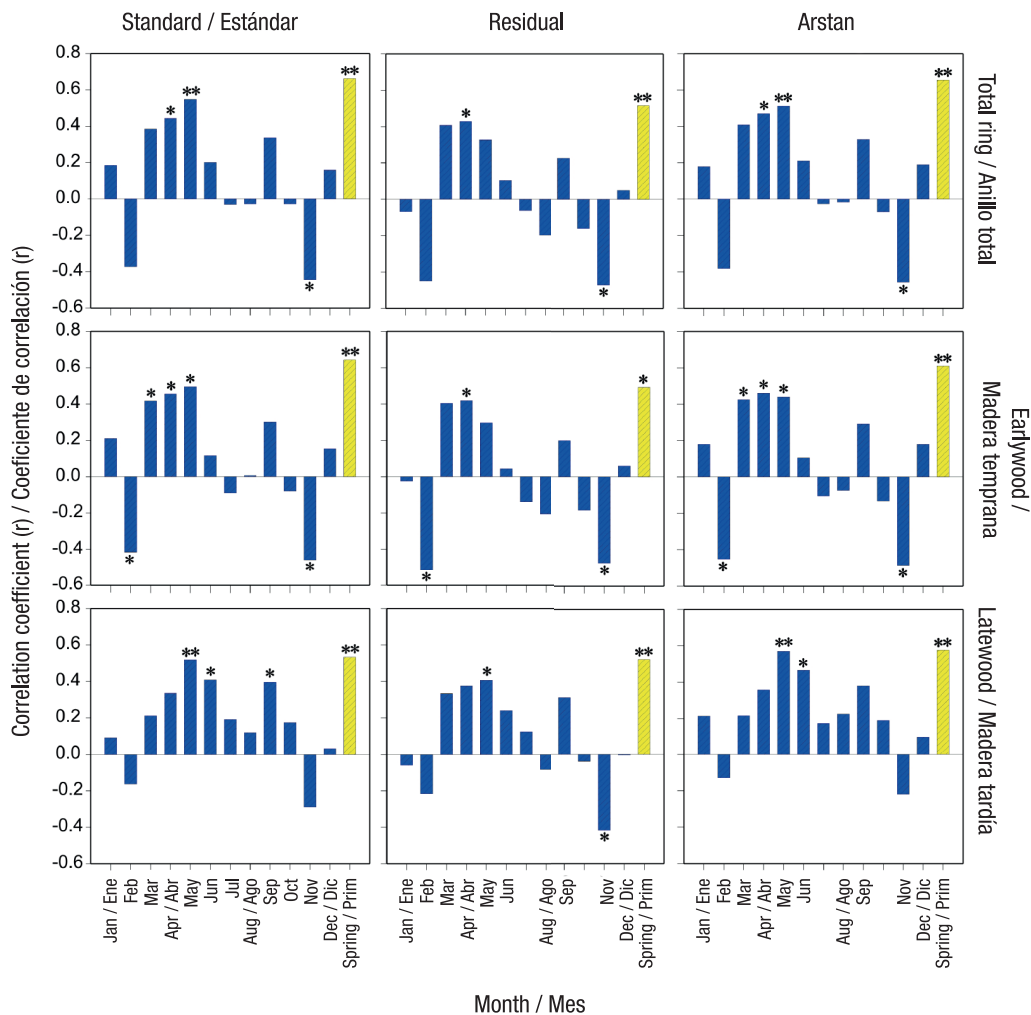


Figure 3. Correlation coefficients between rainfall (monthly [blue bars] and in the spring period [yellow bars]) and the total ring width and early and latewood indices of *Pinus montezumae* in three chronologies (standard, residual and arstan). Months with significant correlations ($P < 0.05$)* and highly significant ones ($P < 0.01$)**.

Figura 3. Coeficientes de correlación entre la precipitación (mensual [barras azules] y en el periodo primavera [barras amarillas]) y el índice de ancho de anillo total, madera temprana y tardía de *Pinus montezumae* en las tres cronologías (estándar, residual y arstan). Meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$)* y altamente significativas ($P < 0.01$)**.

Accumulated rainfall had a better correlation with the spring period (March-May) and was highly significant ($P < 0.01$) in all three chronologies (standard, residual and arstan) of total ring, earlywood and latewood (Figure 3). The low correlation between the ring width index and summer-autumn rainfall has been confirmed in studies of other species of the genus *Pinus* (Cerano-Paredes et al., 2011, 2013; Chávez-Gándara et al., 2017; López-Hernández et al., 2018). This is generally attributed to the abundant rainfall over this period (Figure 1b) which exceeds the infiltration rate, causes saturation in the soil particles, and generates surface runoff, which prevents this rainfall from being used for tree growth (Fritts, 2001).

Table 3 and Figure 4 show the chronologies where the highest correlations between growth indices and climatic variables were obtained. Based on the results, the spring rainy period had more influence on the radial growth of *P. montezumae*; in the standard chronology, the correlations were highly significant ($P < 0.01$) between the rainfall of this period and the latewood ($r = 0.54$), earlywood ($r = 0.649$) and total ring (0.66) indices.

The total ring standard chronology explained the greater variability of the spring rainfall ($R^2 = 0.43$; $P < 0.01$). This is probably due to a gradual increase in the photoperiod that occurs at the beginning of this season; as months go by, light hours increase and the photosynthetic activity of the needles increases, favoring the radial growth of earlywood as days get longer (León-Hernández & Espinoza-de-Pernía, 2001). In addition, during the same season, the maximum temperatures increase; as they rise, the water vapor pressure deficit (VPD) also increases in the needles. At 25°C, the VPD reaches 2.0 kPa and continues to increase as the temperature rises. From 30 °C and a VPD of 3.0 kPa, the stomatal conductance (water output and CO₂ input from the stomas) decreases, and the net photosynthesis rate is zero (Gil-Pelegrin, Aranda, Peguero-Pina, & Vilagrosa, 2005; Kozłowski & Pallardy, 2002). Additionally, due to high temperatures and scarce rainfall, the low air humidity causes the tree to close its stomata to prevent water loss through transpiration (Barceló, Nicolás, Sabater, & Sánchez, 2001) and to consume the resources accumulated in the previous year to form the earlywood (Fritts, 2001).

The radial growth of some conifers in northern sites (Cerano-Paredes et al., 2009; Chávez-Gándara et al., 2017; Constante-García et al., 2009; Villanueva et al., 2009; Villanueva-Díaz et al., 2014) and in some parts of central Mexico (Cerano-Paredes et al., 2013, 2014; Villanueva-Díaz et al., 2018) responds to the winter-spring accumulated rainfall. Other studies in central and southern Mexico report significant correlations ($P < 0.05$) between spring rainfall and

Para el índice de madera tardía, las cronologías estándar y arstan indicaron correlaciones positivas con las precipitaciones de enero, marzo a octubre y diciembre; los meses de mayo, junio y septiembre presentaron correlaciones significativas ($P < 0.05$). En cambio, las correlaciones fueron negativas no significativas ($P < 0.05$) para los meses de febrero y noviembre. La cronología residual registró correlación positiva de marzo a julio y en septiembre, la cual fue significativa ($P < 0.05$) solo en el mes de mayo. En esta misma cronología, la correlación fue negativa significativa ($P < 0.05$) en el mes de noviembre.

La precipitación acumulada tuvo mejor correlación con el periodo de primavera (marzo-mayo) y fue altamente significativa ($P < 0.01$) para las tres cronologías (estándar, residual y arstan) de anillo total, madera temprana y madera tardía (Figura 3). La baja correlación entre el índice de ancho del anillo y la precipitación del periodo verano-otoño ha sido corroborada en estudios de otras especies del género *Pinus* (Cerano-Paredes et al., 2011, 2013; Chávez-Gándara et al., 2017; López-Hernández et al., 2018). Esto generalmente se atribuye a las precipitaciones abundantes durante este periodo (Figura 1b) que superan la tasa de infiltración, causan saturación en las partículas del suelo y generan escurrimiento superficial, lo cual impide que dicha precipitación no sea utilizada para el crecimiento del árbol (Fritts, 2001).

El Cuadro 3 y la Figura 4 muestran las cronologías donde se obtuvieron las correlaciones más altas entre los índices de crecimiento y las variables climáticas. De acuerdo con los resultados, el periodo de lluvia que más influyó en el crecimiento radial de *P. montezumae* fue la primavera; en la cronología estándar, las correlaciones fueron altamente significativas ($P < 0.01$) entre la precipitación de dicho periodo y la madera tardía ($r = 0.54$), madera temprana ($r = 0.649$) y anillo total (0.66).

La cronología estándar de anillo total explicó la mayor variabilidad de la precipitación de primavera ($R^2 = 0.43$; $P < 0.01$). Esto se debe probablemente al aumento progresivo del fotoperiodo que comienza a inicios de dicha estación; conforme los meses pasan, las horas luz aumentan y la actividad fotosintética de las acículas incrementa, favoreciendo el crecimiento radial de madera temprana conforme los días se alargan (León-Hernández & Espinoza-de-Pernía, 2001). Aunado a esto, durante la misma temporada, las temperaturas máximas son elevadas; a medida que estas aumentan, el déficit de presión de vapor de agua (VPD) también se acentúa en las acículas. A 25 °C, el VPD alcanza los 2.0 kPa y sigue aumentando con el incremento de la temperatura. A partir de los 30 °C y 3.0 kPa de VPD, la conductancia estomática (salida de agua y entrada de CO₂ de los estomas) disminuye y la

Table 3. Regression models explaining the greater variability and correlation between *Pinus montezumae* growth indices and climatic variables in the San Antonio Texas Ejido, Coyuca de Catalán, Guerrero.**Cuadro 3. Modelos de regresión que explican la mayor variabilidad y correlación entre los índices de crecimiento de *Pinus montezumae* y las variables climáticas del ejido San Antonio Texas, Coyuca de Catalán, Guerrero.**

Climatic variable/ Variable climática	Model/Modelo	Estimated parameters / Parámetros estimados	Standard error/ Error estándar	Mean Square/ Cuadrado medio	r	R ²	Pr > F
Standard chronology/Cronología estándar							
Spring rainfall /Primavera	Intercept/Intercepto	-250.189	81.138	81 744.43	0.66	0.430	<0.005
	Total ring/ Anillo total	329.534	79.895				<0.000
	Intercept/Intercepto	-251.266	85.299	77 380.42	0.64	0.410	<0.007
	Earlywood/ Madera temprana	335.546	85.323				<0.000
May-July maximum temperature/ Temperatura máxima mayo-julio	Intercept/Intercepto	-151.110	77.827	55 049.77	0.54	0.290	0.065
	Latewood/ Madera tardía	232.067	76.732				<0.006
	Intercept/Intercepto	24.860	1.209	21.07	0.31	0.100	<0.000
	Total ring/ Anillo total	2.734	1.205				<0.027
May-September minimum temperature/ Temperatura mínima mayo-septiembre	Intercept/Intercepto	24.846	1.223	20.83	0.31	0.100	<0.000
	Earlywood/ Madera temprana	2.769	1.228				<0.028
	Intercept/Intercepto	24.752	1.08	27.90	0.35	0.120	<0.000
	Latewood/ Madera tardía	2.910	1.096				<0.010
January-March minimum temperature/ Temperatura mínima enero-marzo	Intercept/Intercepto	15.294	1.374	0.79	-0.05	-0.003	<0.000
	Total ring/ Anillo total	-0.532	1.369				0.699
	Intercept/Intercepto	15.737	1.383	2.68	-0.10	-0.010	<0.000
	Earlywood/ Madera temprana	-0.994	1.390				0.477
Residual chronology/Cronología residual	Intercept/Intercepto	13.277	1.232	8.11	0.18	0.030	<0.000
	Latewood/ Madera tardía	1.568	1.249				0.214
	Intercept/Intercepto	14.620	1.508	20.80	-0.28	-0.080	<0.000
	Total ring/ Anillo total	-3.085	1.501				<0.045
Residual chronology/Cronología residual	Intercept/Intercepto	14.593	1.464	21.65	-0.29	-0.084	<0.000
	Earlywood/ Madera temprana	-3.068	1.461				<0.000
	Intercept	13.653	1.574	9.25	-0.19	-0.040	<0.000
	Latewood/ Madera tardía	-2.134	1.593				<0.000

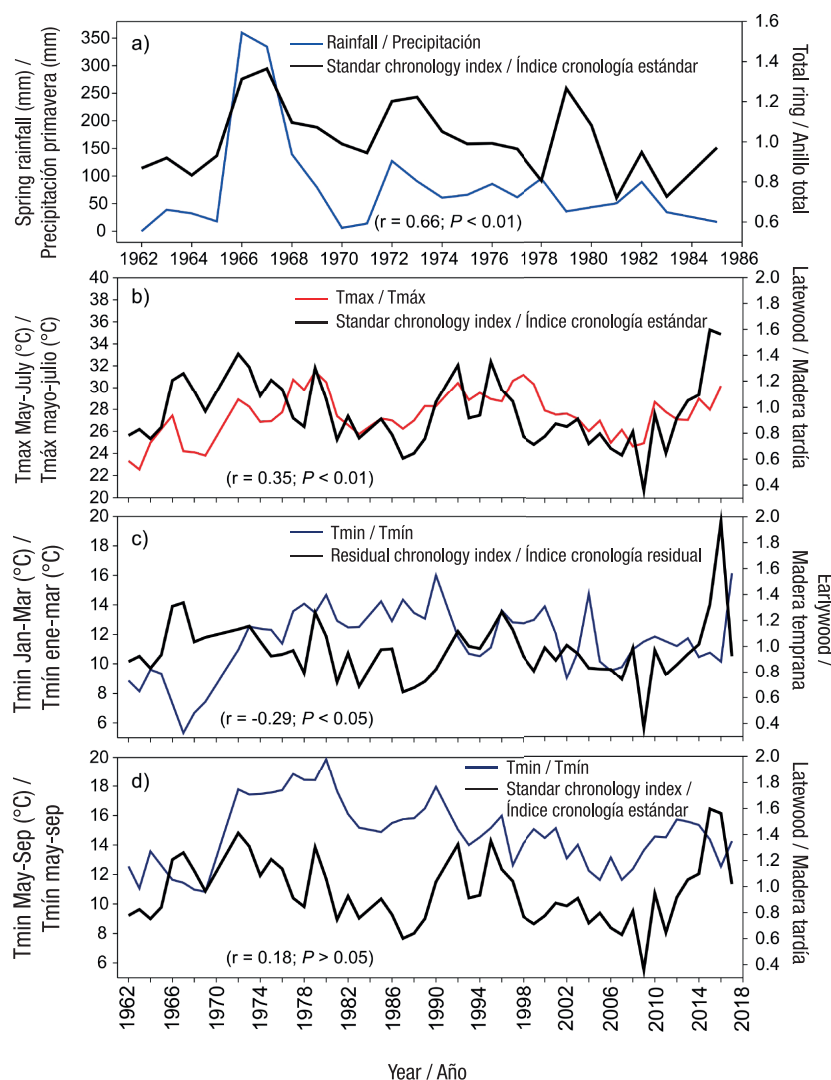


Figure 4. Best correlations between *Pinus montezumae* growth indices (total ring, early and latewood) and climatic variables (accumulated spring rainfall [1962-1985], May-July maximum temperature, and January-March and May-September minimum temperature [1962-2016]).

Figura 4. Mejores correlaciones entre los índices de crecimiento de *Pinus montezumae* (anillo total, madera temprana y tardía) y las variables climáticas (precipitación acumulada de primavera [1962-1985], temperatura máxima de mayo-julio y temperatura mínima de enero-marzo y mayo-septiembre [1962-2016]).

radial growth of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. ($r = 0.65$; Huante et al., 1991) and *Pinus oocarpa* Schiede ($r = 0.71$; López-Hernández et al., 2018). The difference in the response to rainfall among species in northern, central and southern Mexico is partially attributed to anticipated rainfall in southern regions caused by the North American Monsoon System (NAMS). The NAMS is characterized by intense rainfall starting in mid-May along the western coast of Mexico, advancing into the southwestern United States through July and August (Therrell et al., 2002).

Growth response to maximum temperature

Figure 5 shows a positive relationship between the radial growth of *P. montezumae* and the maximum

tasa de fotosíntesis neta es nula (Gil-Pelegrín, Aranda, Peguero-Pina, & Vilagrosa, 2005; Kozłowski & Pallardy, 2002). Por otra parte, debido a las temperaturas altas y las precipitaciones bajas, la poca humedad en el aire provoca que el árbol cierre los estomas para evitar la pérdida de agua por transpiración (Barceló, Nicolás, Sabater, & Sánchez, 2001) y que consuma los recursos acumulados del año anterior para formar la madera temprana (Fritts, 2001).

El crecimiento radial de algunas coníferas en sitios del norte (Cerano-Paredes et al., 2009; Chávez-Gándara et al., 2017; Constante-García et al., 2009; Villanueva et al., 2009; Villanueva-Díaz et al., 2014) y en algunas partes del centro de México (Cerano-Paredes et al., 2013, 2014; Villanueva-Díaz et al., 2018) responden

temperatures in March to October, and December in the three-growth series (total ring, earlywood and latewood). With the standard and arstan chronologies, the correlations were significant ($P < 0.05$) between the maximum temperatures of May and June and the total ring, early and latewood indices, whereas with the residual chronology only May had significant correlation ($P < 0.05$) with the three-growth series. On the other hand, non-significant negative correlations ($P > 0.05$) were determined between the maximum temperature and the total ring growth index in January, February and November for all three chronologies; for early and latewood, only the residual chronology showed this same behavior.

a la precipitación acumulada del periodo invierno-primavera. Otras investigaciones en el centro y sur de México reportan correlaciones significativas ($P < 0.05$) entre la precipitación de primavera y el crecimiento radial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltldl. & Cham. ($r = 0.65$; Huante et al., 1991) y *Pinus oocarpa* Schiede ($r = 0.71$; López-Hernández et al., 2018). 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, causadas por el Sistema de Monzones de América del Norte (NAMS, por sus siglas en inglés). Este se caracteriza por lluvias intensas a partir de mediados de mayo a lo largo de la costa occidental de México, avanzando hacia el

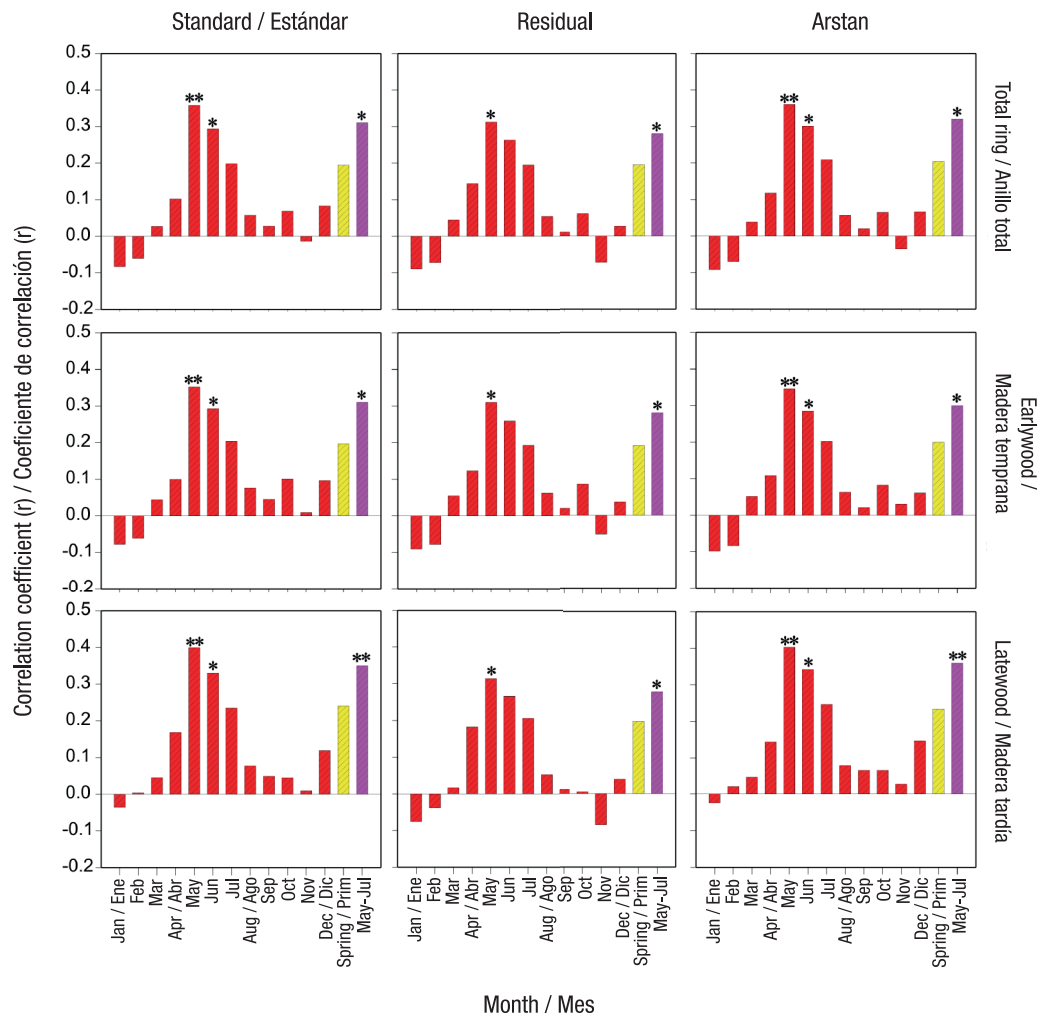


Figure 5. Correlation coefficient between maximum temperature (monthly [red bars], March-May [yellow bars] and May-July [pink bars] periods) and the total ring width and early and latewood indices of *Pinus montezumae* for the three chronologies (standard, residual and arstan). Months with significant correlations ($P < 0.05$)* and highly significant ones ($P < 0.01$ **).

Figura 5. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima (mensual [barras rojas], periodo marzo-mayo [barras amarillas] y mayo-julio [barras en rosa]) y el índice de ancho de anillo total, madera temprana y madera tardía de *Pinus montezumae* para las tres cronologías (estándar, residual y arstan). Meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$)* y altamente significativas ($P < 0.01$ **).

Regarding periods, the growth of *P. montezumae* responded positively to the spring period average maximum temperature, as it did to rainfall; however, the correlation was not significant. Conversely, the total ring growth and earlywood series had significant positive correlations ($P < 0.05$) for the May-July period with all three chronologies, while latewood showed a highly significant correlation ($P < 0.01$) with the May-July period in the standard and arstan chronologies (Figure 5). The maximum temperature of the May-July period significantly influenced ($r = 0.31$; $P < 0.05$) total ring and earlywood growth, and had a highly significant impact ($r = 0.35$; $P < 0.01$) on latewood growth (Figure 4b; Table 3).

Most conifers have negative correlations between growth and maximum temperature (Cerano-Paredes et al., 2014; Chávez-Gándara et al., 2017; Gutiérrez-García & Ricker, 2019; Huante et al., 1991); that is, as maximum temperatures increase, growth is negatively affected. This is generally attributed to temperatures above 25 °C exerting a 2.0 kPa VPD at the stoma level, causing a decrease in stomatal opening; as temperature increases, the VPD also rises up to 3.0 kPa at 30 °C. This causes photosynthesis to be practically null, so the exchange of gases from the atmosphere and the leaf does not take place (Gil-Pelegrin et al., 2005), decreasing the production of carbohydrates available for growth (Kozłowski & Pallardy, 2002).

In this study, *P. montezumae* responds to maximum temperature in the opposite way to what is reported for conifers in Mexico, with May-July (late spring and mid-summer) being the most important period ($r = 0.35$; $P < 0.05$) (Table 3). An explanation for this is that 40 % (570 mm) of average annual rainfall (1 426 mm) occurs in this period (Figure 1b), so soil moisture and relative humidity conditions are available in adequate amounts. Thus, when there is enough environmental and soil moisture, temperatures above 25 °C do not generate water stress as occurs in other locations (Gil-Pelegrín et al., 2005).

In the May-July period, most earlywood is already formed, so the environmental conditions and physiological processes of the species have a greater influence on latewood formation. This is corroborated by determining significant positive correlations ($r = 0.35$; $P < 0.01$) between the latewood growth index and maximum temperature in May-July (Figure 4b). López-Hernández et al. (2018) also report positive correlations between the latewood chronology of *P. oocarpa* and maximum temperature during the year, with the July-January period being significant ($P < 0.05$). Based on the results, *P. montezumae* responds significantly to maximum temperature and has the potential to reconstruct the maximum temperature variability of

suroeste de Estados Unidos hasta los meses de julio y agosto (Therrell et al., 2002).

Respuesta del crecimiento a la temperatura máxima

La Figura 5 indica que el crecimiento radial de *P. montezumae* presenta relación positiva con las temperaturas máximas de los meses de marzo a octubre y el mes de diciembre en las tres series de crecimiento (anillo total, madera temprana y madera tardía). Con las cronologías estándar y arstan, las correlaciones fueron significativas ($P < 0.05$) entre las temperaturas máximas de mayo y junio y los índices de anillo total, madera temprana y tardía; mientras que con la cronología residual solo el mes de mayo tuvo correlación significativa ($P < 0.05$) con las tres series de crecimiento. Por otra parte, se determinaron correlaciones negativas no significativas ($P > 0.05$) entre la temperatura máxima y el índice de crecimiento de anillo total en los meses de enero, febrero y noviembre en las tres cronologías; para la madera temprana y tardía, únicamente la cronología residual mostró este mismo comportamiento.

Con respecto a los periodos, el crecimiento de *P. montezumae* respondió de manera positiva a la temperatura máxima promedio del periodo de primavera, como sucedió con la precipitación; sin embargo, la correlación no fue significativa. En contraste, las series de crecimiento de anillo total y madera temprana presentaron correlaciones positivas significativas ($P < 0.05$) para el periodo de mayo-julio con las tres cronologías, mientras que la madera tardía registró correlación altamente significativa ($P < 0.01$) con el periodo mayo-julio en las cronologías estándar y arstan (Figura 5). La temperatura máxima del periodo mayo-julio influyó de forma significativa ($r = 0.31$; $P < 0.05$) en el crecimiento del anillo total y la madera temprana, y de manera altamente significativa ($r = 0.35$; $P < 0.01$) en el crecimiento de la madera tardía (Figura 4b; Cuadro 3).

En su mayoría, las coníferas tienen correlaciones negativas entre el crecimiento y la temperatura máxima (Cerano-Paredes et al., 2014; Chávez-Gándara et al., 2017; Gutiérrez-García & Ricker, 2019; Huante et al., 1991); es decir, a medida que las temperaturas máximas incrementan, el crecimiento es afectado negativamente. Generalmente, esto se atribuye a que las temperaturas mayores de 25 °C ejercen una VPD de 2.0 kPa a nivel estomático, provocando disminución en la apertura del estoma; conforme la temperatura aumenta, el VPD también se eleva hasta alcanzar los 3.0 kPa a 30 °C. Esto 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 (Gil-Pelegrín et al., 2005), disminuyendo la producción

the May-July period based on the latewood index of the standard chronology (Table 3).

Growth response to minimum temperature

Figure 6 shows that the total ring and earlywood growth indices of *P. montezumae* have a negative correlation with the monthly minimum temperature in all three chronologies, except for the total ring index with respect to June in the residual chronology. The correlation was highly significant ($P < 0.01$) in March for all three chronologies. Regarding the latewood growth index, the January-April period had non-

de carbohidratos disponibles para el crecimiento (Kozłowski & Pallardy, 2002).

En este estudio, *P. montezumae* responde a la temperatura máxima de manera opuesta a lo reportado para las coníferas de México, siendo el periodo mayo-julio (finales de primavera y mediados de verano) el más importante ($r = 0.35$; $P < 0.05$) (Cuadro 3). Una explicación a lo anterior es que, 40 % (570 mm) de la precipitación media anual (1 426 mm) ocurre en dicho periodo (Figura 1b), por lo que las condiciones de humedad en el suelo y humedad relativa se encuentran disponibles en cantidades adecuadas. De esta manera,

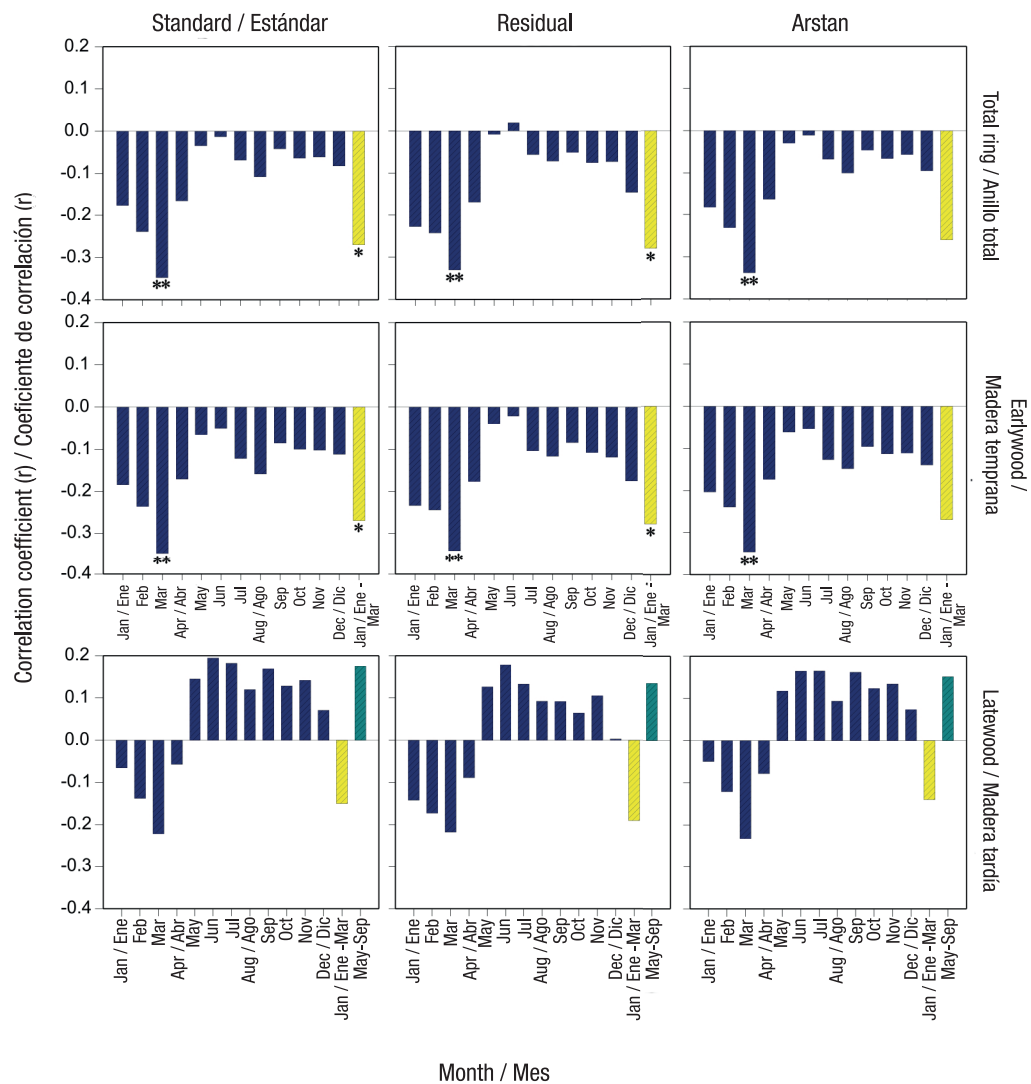


Figure 6. Correlation coefficients between minimum temperature (monthly [blue bars], January-March [yellow bars] and May-September [green bars] periods) and the growth indices of *Pinus montezumae* in three chronologies (standard, residual and arstan). Months with significant correlations ($P < 0.05$)* and highly significant ones ($P < 0.01$)**.

Figura 6. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima (mensual [barras azules], periodo enero-marzo [barras amarillas] y mayo-septiembre [barras verdes]) y los índices de crecimiento de *Pinus montezumae* en las tres cronologías (estándar, residual y arstan). Meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$)* y altamente significativas ($P < 0.01$)**.

significant negative correlations ($P > 0.05$) for all three chronologies, and the May-December period showed non-significant positive correlations ($P > 0.05$).

The minimum temperature of the January-March period shows a significant negative correlation ($P < 0.05$) with the total ring and earlywood indices in the standard and residual chronologies. The highest correlation was observed between minimum temperature and the earlywood index of the residual chronology ($r = -0.29$; $P < 0.05$) (Table 3; Figure 4c). On the other hand, only latewood had a positive correlation with the minimum temperature of the May-September period, being greater with the standard chronology, although it was not significant ($r = 0.18$; $P > 0.05$) (Figures 4d and 6).

As with maximum temperature, the radial growth of *P. montezumae* responds in the opposite way to minimum temperature when compared to other dendroclimatic studies in Mexico, which report significant positive correlations between winter temperature and conifer growth (Cerano-Paredes et al., 2014; Cerano-Paredes, Rivera, Estrada, Trucios, & Ríos, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017; Huante et al., 1991; López-Hernández et al., 2018). For *P. montezumae*, the January-March minimum temperature has a significant negative correlation with early growth; that is, low temperatures at the beginning of the growing season affect earlywood formation, while when these begin to rise, starting in May (Figure 1b), positive correlations are observed with latewood (Figure 6). However, the low correlation and therefore the low variability that is explained prevents the standard chronology of latewood from being used to reconstruct the minimum temperature of the May-September period (Figure 4d, Table 3).

The growth response to minimum temperatures is mainly attributed to lower evaporation from soil and plants caused by these temperatures, which in turn translates into available water to be used at the beginning of the growing season (Cerano-Paredes et al., 2011; Chávez-Gándara et al., 2017). Temperature is one of the main environmental factors determining the type of adaptation required by plants in order to maintain their photosynthetic rate (Chaar, 2013). Thus, some species of *Pinus* drastically reduce their photosynthetic rate at temperatures below 10 °C and stop it completely at temperatures close to 5 °C (Huxman, Turnipseed, Sparks, Harley, & Monson, 2003). An optimal interval for the photosynthesis of some conifers is between 15 and 25 °C, gradually decreasing at both extremes (Huxman et al., 2003; McCullough, Davis, & Williams, 2017; Williams et al., 2013). Therefore, low temperatures, even if they are not extreme (Figure 1b), affect the earlywood formation of *P. montezumae* at the

al haber suficiente humedad en el ambiente y en el suelo, las temperaturas superiores a 25 °C no generan estrés hídrico como sucede en otros sitios (Gil-Pelegrín et al., 2005).

En el periodo mayo-julio, la mayor parte de la madera temprana ya se encuentra formada, por lo que las condiciones ambientales y procesos fisiológicos de la especie influyen más en la formación de la madera tardía. Esto se corrobora al determinar correlaciones positivas significativas ($r = 0.35$; $P < 0.01$) entre el índice de crecimiento de madera tardía y la temperatura máxima de mayo-julio (Figura 4b). López-Hernández et al. (2018) también reportan correlaciones positivas entre la cronología de madera tardía de *P. oocarpa* y la temperatura máxima durante todo el año, siendo significativo ($P < 0.05$) el periodo julio-enero. De acuerdo con los resultados, *P. montezumae* responde significativamente a la temperatura máxima y tiene potencial para reconstruir la variabilidad de la temperatura máxima del periodo mayo-julio con base en el índice de madera tardía de la cronología estándar (Cuadro 3).

Respuesta del crecimiento a la temperatura mínima

La Figura 6 muestra que los índices de crecimiento de anillo total y madera temprana de *P. montezumae* tienen correlación negativa con la temperatura mínima mensual en las tres cronologías, a excepción del anillo total con el mes de junio en la cronología residual. La correlación fue altamente significativa ($P < 0.01$) en el mes de marzo para las tres cronologías. Con relación al índice de crecimiento de madera tardía, los meses de enero-abril registraron correlaciones negativas no significativas ($P > 0.05$) para las tres cronologías, y los meses de mayo a diciembre correlaciones positivas no significativas ($P > 0.05$).

La temperatura mínima del periodo enero-marzo presenta correlación negativa significativa ($P < 0.05$) con el índice de anillo total y madera temprana en las cronologías estándar y residual. La más alta correlación se registró entre la temperatura mínima y el índice de madera temprana de la cronología residual ($r = -0.29$; $P < 0.05$) (Cuadro 3; Figura 4c). Por otra parte, solo la madera tardía tuvo correlación positiva con la temperatura mínima del periodo mayo-septiembre, siendo mayor con la cronología estándar, aunque no fue significativa ($r = 0.18$; $P > 0.05$) (Figuras 4d y 6).

Tal como ocurrió con la temperatura máxima, el crecimiento radial de *P. montezumae* responde de manera opuesta a la temperatura mínima en comparación con lo obtenido en otros estudios dendroclimáticos en México, los cuales reportan correlaciones positivas significativas entre la temperatura invernal y el

beginning of the growing season in the San Antonio Texas Ejido, as opposed to what occurs in northern and central Mexican sites. This is corroborated by determining negative correlations ($r = -0.27$, $P < 0.05$) between the earlywood growth and total ring indices with the minimum temperature of the January-March period (Figure 6). As for the latewood index and its correlation with the minimum temperature, the values go from being negative to positive from May onwards, but they are not significant.

Conclusions

This study is the first dendroclimatic analysis done for the state of Guerrero, and one of the first for *P. montezumae* in the country. The growth indices of this species show potential for reconstructing the spring rainfall (March-May) and the maximum temperature of May-July. Given its wide distribution in Mexico, *P. montezumae* is worthy of study, in addition to climate variability and ecological, pyrochronological and geomorphological aspects at different latitudes and altitudes.

Acknowledgements

This research was funded by the UAAAN project "Dendrochronological studies in the Sierras Madre Occidental, Oriental and Southern Mexico, code number 38111-425103001-2346". We are grateful to the anonymous reviewers for their valuable comments that improved the manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., & Sánchez, R. (2001). *Fisiología vegetal*. Madrid, España: Ediciones Pirámide.
- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Rubio-Camacho, E. A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 413-423. doi: 10.5154/rchscfa.2013.02.007
- Cerano-Paredes, J., Rivera, G. M., Estrada, A. J., Trucios, C. R., & Ríos, J. C. (2012). Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* en Durango, México. *Agrofaz*, 12(3), 81-88. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5517460>
- 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

crecimiento de coníferas (Cerano-Paredes et al., 2014; Cerano-Paredes, Rivera, Estrada, Trucios, & Ríos, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017; Huante et al., 1991; López-Hernández et al., 2018). Para *P. montezumae*, la temperatura mínima del periodo enero-marzo presenta correlación negativa significativa con el crecimiento temprano; es decir, temperaturas bajas a inicios de la estación de crecimiento afectan la formación de madera temprana, mientras que, cuando estas comienzan a subir, a partir de mayo (Figura 1b), se observan correlaciones positivas con la madera tardía (Figura 6). No obstante, la baja correlación y, por lo tanto, la poca variabilidad que se explica impide que la cronología estándar de madera tardía sea utilizada para reconstruir la temperatura mínima del periodo mayo-septiembre (Figura 4d, Cuadro 3).

La respuesta del crecimiento a las temperaturas mínimas se atribuye, principalmente, a que estas propician menor evaporación del suelo y las plantas, lo cual se traduce en agua disponible para emplearse al inicio de la estación de crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2011; Chávez-Gándara et al., 2017). La temperatura es uno de los principales factores ambientales que determinan el tipo de adaptación que la planta requiere, 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 de 10 °C y la detienen totalmente a temperaturas cercanas a 5 °C (Huxman, Turnipseed, Sparks, Harley, & Monson, 2003). Un intervalo óptimo para la fotosíntesis de algunas coníferas se encuentra entre 15 y 25 °C, disminuyendo gradualmente a ambos extremos (Huxman et al., 2003; McCullough, Davis, & Williams, 2017; Williams et al., 2013). Por tanto, las temperaturas bajas, aunque no sean extremas (Figura 1b), afectan la formación de madera temprana de *P. montezumae* a inicios de la estación de crecimiento en el ejido San Antonio Texas, contrario a lo que sucede en sitios del norte y centro de México. Lo anterior se corrobora al determinar correlaciones negativas ($r = -0.27$, $P < 0.05$) entre el índice de crecimiento de madera temprana y anillo total con la temperatura mínima del periodo enero-marzo (Figura 6). En cuanto al índice de madera tardía y su correlación con la temperatura mínima, los valores pasan de ser negativos a positivos a partir del mes de mayo, pero son no significativos.

Conclusiones

Este estudio representa el primer trabajo dendroclimático realizado para el estado de Guerrero y uno de los primeros para *P. montezumae* en el país. Los índices de crecimiento de esta especie presentan potencial para reconstruir la precipitación de primavera (marzo-mayo) y la temperatura máxima de mayo-julio. Dada su amplia distribución en México, la especie

- Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41–54. doi: 10.14350/rig.35190
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, Z. P., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez, C. I., & Valdez-Cepeda, D. R. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–44. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712009000200002&script=sci_arttext&tIng=en
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, D., Cornejo-Oviedo, H. E., Sánchez-Cohen, I., & Constante-García, V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 33–46. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000200004&script=sci_arttext
- Chaar, J. (2013). Resistencia a heladas en plantas frutales. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 109–121. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/837/83728497009.pdf>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). Estaciones climatológicas. Retrieved October 19, 2019 from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H., & Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17–39. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-35862009000200002&script=sci_arttext&tIng=en
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., & Estrada-Ávalos, J. (2010). *Parámetros para definir el potencial dendrocronológico*. Durango, México: INIFAP, CENID-RASPA.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37–59. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261788/trb-47-037-059.pdf?sequence=1>
- Fonseca, R. M. (2013). *Pinaceae*. In N. D. Pérez, & R. M. Fonseca (Eds.), *Flora de Guerrero* (pp. 1–65). México: UNAM. Retrieved from <http://biologia.fcencias.unam.mx/plantasvasculares/PDF%20FLORAS/58%20Pinaceae.pdf>
- Fritts, H. C. (2001). *Tree rings and climate*. New Jersey: Blackburn Press, Caldwell
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.ª ed.). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- constituye una alternativa para estudiar, además de la variabilidad climática, aspectos ecológicos, pirocronológicos y geomorfológicos a diferentes latitudes y altitudes.

Agradecimientos

Esta investigación se financió a través del proyecto “Estudios dendrocronológicos en las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur de México, con clave número 38111-425103001-2346” de la UAAAN. Agradecemos a los revisores anónimos por los valiosos comentarios que mejoraron el manuscrito.

Fin de la versión en español

- Gil-Pelegrín, E., Aranda, I., Peguero-Pina, J. J., & Vilagrosa, A. (2005). El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 14(3), 358–370. Retrieved from [http://www.inia.es/gcontrec/pub/GIL-ARANDA-PEGUERO-VILAGROSA_\(SRF14-3\)_1162282824390.pdf](http://www.inia.es/gcontrec/pub/GIL-ARANDA-PEGUERO-VILAGROSA_(SRF14-3)_1162282824390.pdf)
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/244461190_Evaluating_crossdating_accuracy_a_manual_and_tutorial_for_the_computer_program_COFECHA
- Gutiérrez-García, G., & 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-Merino, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. In X. Nieto & M. A. Cau (Eds.), *Arqueología nautica mediterrània* (pp. 309–322). España: Generalitat de Catalunya. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228769173_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43(1), 69–78. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.01.004
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico. *Tree-Ring Research*, 51, 16–28. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/262286/trb-51-015-028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Huxman, T. E., Turnipseed, A. A., Sparks, J. P., Harley, P. C., & Monson, R. K. (2003). Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 134, 537–546 doi: 10.1007/s00442-002-1131-1

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México, escala: 1:50000. Retrieved October 19, 2019 from <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (conjunto nacional). Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Kozłowski, T. T., & Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review*, 68(2), 270–334. doi: 10.1663/0006-8101(2002)068[0270:AAAROW]2.0.CO;2
- León-Hernández, W. J., & Espinoza-de-Pernía, N. (2001). *Anatomía de la madera* (1.ª ed.). Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, F. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* a variables climáticas en Chiapas, México. *Biología Tropical*, 66(4), 1580–1596. Retrieved from <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1580.pdf>
- McCullough, I. M., Davis, F. W., & 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
- Plomion, C., Leprévost, G., & Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127, 1513–1523. doi: 10.1104/pp.010816
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1.ª edición digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- StatSoft Inc. (2000). STATISTICA software, kernel release version 5.5 A. Tulsa, Oklahoma, USA: Author.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(14), 1–8. doi: 10.1029/2001JD000851
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Rosales-Mata, S., Arrocena-López, J. C., Stahle, D. W., Ruiz-Corral, J. A., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 1897–1912. doi: 10.29312/remexca.v0i10.1025
- Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Cerano, P. J., Estrada, Á. J., & Sánchez, C. I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia Forestal en México*, 34(105), 39–71. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n105/v34n105a3.pdf>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, Á. A., Zavala-Aguirre, J. L., 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), 1–14. doi: 10.21829/myb.2018.2411464
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(2), 175–185. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000200175
- VoorTech. (2007). Measure J2X software. The tree ring measuring program. Retrieved from www.voortech.com/projectj2x
- Williams, A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., ...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