

RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN INVIERNO-PRIMAVERA CON ANILLOS ANUALES DE *Pinus douglasiana* EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA DE MANANTLÁN, JALISCO

RECONSTRUCTION OF WINTER-SPRING PRECIPITATION WITH ANNUAL RINGS OF *Pinus douglasiana* IN THE SIERRA DE MANANTLÁN BIOSPHERE RESERVE, JALISCO

Julián Cerano-Paredes¹; Jorge Méndez-González²;
Abihail Amaro-Sánchez²; José Villanueva-Díaz¹;
Rosalinda Cervantes-Martínez¹; Ernesto A. Rubio-Camacho³

¹INIFAP CENID-RASPA. km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango. México. Correo-e: cerano.julian@inifap.gob.mx

Tel: (871) 159 01 04 (Autor para correspondencia).

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro núm. 1923.

C. P. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

³INIFAP Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. km 8 carr. Tepatitlán-Lagos de Moreno. C. P. 47600. Apartado postal 56. Tepatitlán, Jalisco. México.

RESUMEN

Se reconstruyó la precipitación invierno-primavera de 219 años (1792-2010) de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), Jalisco, México, empleando los anillos anuales de *Pinus douglasiana* (Mtz.) como “proxy”. La sequía de mediados del siglo XX (1941-1963) fue la más severa del periodo estudiado. El índice multivariado de El Niño Oscilación del Sur (ENSO; 1959-2010) y el índice de ancho del anillo de *P. douglasiana* mostraron correlación significativa ($r = 0.4542$; $P < 0.05$) de los meses de enero-junio, con mayor correlación en los meses de enero ($r = 0.4337$; $P < 0.0001$) y marzo ($r = 0.4310$; $P < 0.0001$). Las teleconexiones de ENSO en la región varían a través del tiempo; de enero a junio, los eventos El Niño están asociados con precipitaciones mayores que el promedio, mientras que los eventos La Niña muestran lo contrario.

PALABRAS CLAVE:

Dendrocronología, lluvia, sequía, frecuencia.

ABSTRACT

Winter-spring precipitation in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve (SMBR) in Jalisco, Mexico, was reconstructed for a 219-year period (1792-2010) using the annual rings of *Pinus douglasiana* (Mtz.) as proxy. The drought of the mid-twentieth century (1941-1963, 22 years) was the most severe of the study period. The multivariate El Niño Southern Oscillation index (MEI) (1959-2010) and the tree-ring width index of *P. douglasiana* showed significant correlation ($r = 0.4542$; $P < 0.05$) for the months of January–June, with higher correlation for the months of January ($r = 0.4337$; $P < 0.0001$) and March ($r = 0.4310$; $P < 0.0001$). ENSO teleconnections in the region vary over time; from January to May, El Niño events are associated with higher than average rainfall, while La Niña events show the opposite.

KEYWORDS: Dendrochronology, rainfall, drought, frequency.



Recibido: 14 de febrero, 2013

Aceptado: 02 de octubre, 2013

doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.02.007

<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

La dendrocronología emplea anillos anuales de crecimiento de árboles para reconstruir y analizar eventos pasados del clima (Stahle et al., 2011). Dicha disciplina se utiliza cada vez más para conocer la historia de las variaciones climáticas en escalas de tiempo mayor. La variabilidad del clima es uno de los temas más relevantes de las ciencias ambientales (Cerano et al., 2009), ya que permite determinar los patrones espacio-temporales, tendencias y posible comportamiento futuro (Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez, & Constante, 2011b).

En México, la información climática instrumental disponible es reducida (de aproximadamente 70 años), lo cual limita conocer el comportamiento climático histórico (Cerano et al., 2011a; Díaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; Villanueva, Fulé, Cerano, Estrada, & Sánchez, 2009). El principal interés de generar nuevas cronologías se centra en ampliar la red de registros “proxy” que permitan generar información climática extensa, para conocer la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (Cerano et al., 2011b; Fritts, 1991) y sus posibles impactos en los diversos sectores socioeconómicos del país.

La Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), por su gran extensión (139,500 ha), constituye el área natural protegida más importante del occidente de México. La reserva alberga gran riqueza de especies en sus bosques; adicionalmente, éstos desempeñan un importante papel como fuente de recursos hídricos, pues sus cuencas abastecen de agua a una población de más de 400,000 habitantes (Instituto Nacional de Ecología [INE], 2000). Dada la importancia de la RBSM, en el presente estudio se plantearon como objetivos: 1) Desarrollar la primera cronología de *Pinus douglasiana* (Mtz.), 2) Reconstruir la variabilidad climática histórica y 3) Evaluar la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO) sobre la variabilidad de precipitación en la RBSM. Se plantea la hipótesis de que los anillos de crecimiento de *P. douglasiana* son un “proxy” que permiten reconstruir la variabilidad hidroclimática de la RBSM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

El área de estudio se localiza en el Cerro Alto Las Yeguas (19° 37' N y 104° 14' W), municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México. El clima del sitio es templado subhúmedo (Cw₂) con precipitación superior a 700 mm y altitud de 600 a 2,160 m (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2003) (Figura 1). Las especies vegetales representativas son *P. douglasiana*, *P. oocarpa*, *P. herrerae* y *Quercus resinosa* (INE, 2000).

Reconstrucción de la variabilidad climática de la RBSM

En este estudio se seleccionaron 41 árboles de *P. dougl-*

INTRODUCTION

Dendrochronology uses annual rings to reconstruct and analyze past climate events (Stahle et al., 2011). This discipline is increasingly being used to learn about the history of climate variations on long time scales. Climate variability is one of the most important issues in environmental sciences (Cerano et al., 2009), since it allows determining spatial-temporal patterns, trends and possible future behavior (Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez, & Constante, 2011b). In Mexico, the instrumental climate information available is limited (about 70 years), which limits our ability to know historical climate behavior (Cerano et al., 2011a; Díaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; Villanueva, Fulé, Cerano, Estrada, & Sánchez, 2009). The main interest in generating new chronologies centers on expanding the network of “proxy” records that can generate extensive climate information, to determine the frequency and intensity of extreme weather events (Cerano et al., 2011b; Fritts, 1991) and their potential impacts on the country's various socioeconomic sectors.

The Sierra de Manantlán Biosphere Reserve (SMBR), because of its size (139,500 ha), is the most important protected area in western Mexico. The reserve is home to a great richness of species in its forests; in addition, the latter play an important role as a source of water resources, as their watersheds supply water to a population of over 400,000 inhabitants (National Ecology Institute [INE], 2000). Given the importance of the SMBR, the objectives of this study were to: 1) develop the first chronology of *Pinus douglasiana* (Mtz.), 2) reconstruct historical climate variability and 3) evaluate the influence of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) on rainfall variability in the SMBR. It is hypothesized that the annual rings of *P. douglasiana* are a “proxy” that allows reconstructing the hydroclimatic variability of the SMBR.

MATERIALS AND METHODS

Characterization of the study area

The study area is located in the Cerro Alto Las Yeguas (19° 37' N and 104° 14' W), municipality of Autlán de Navarro, Jalisco, Mexico. The area climate is humid temperate (Cw₂) with rainfall exceeding 700 mm and an altitude of 600 to 2,160 m (National Institute of Statistics and Geography [INEGI], 2003) (Figure 1). The representative plant species are *P. douglasiana*, *P. oocarpa*, *P. herrerae* and *Quercus resinosa* (INE, 2000).

Reconstruction of the climatic variability of the RBSM

In this study we selected 41 *P. douglasiana* trees, from which two to three growth cores (increments) were extracted using a Pressler drill (Haglof brand, Forest Action Group [GAF-MEX], Mexico). Samples were prepared and predated ac-

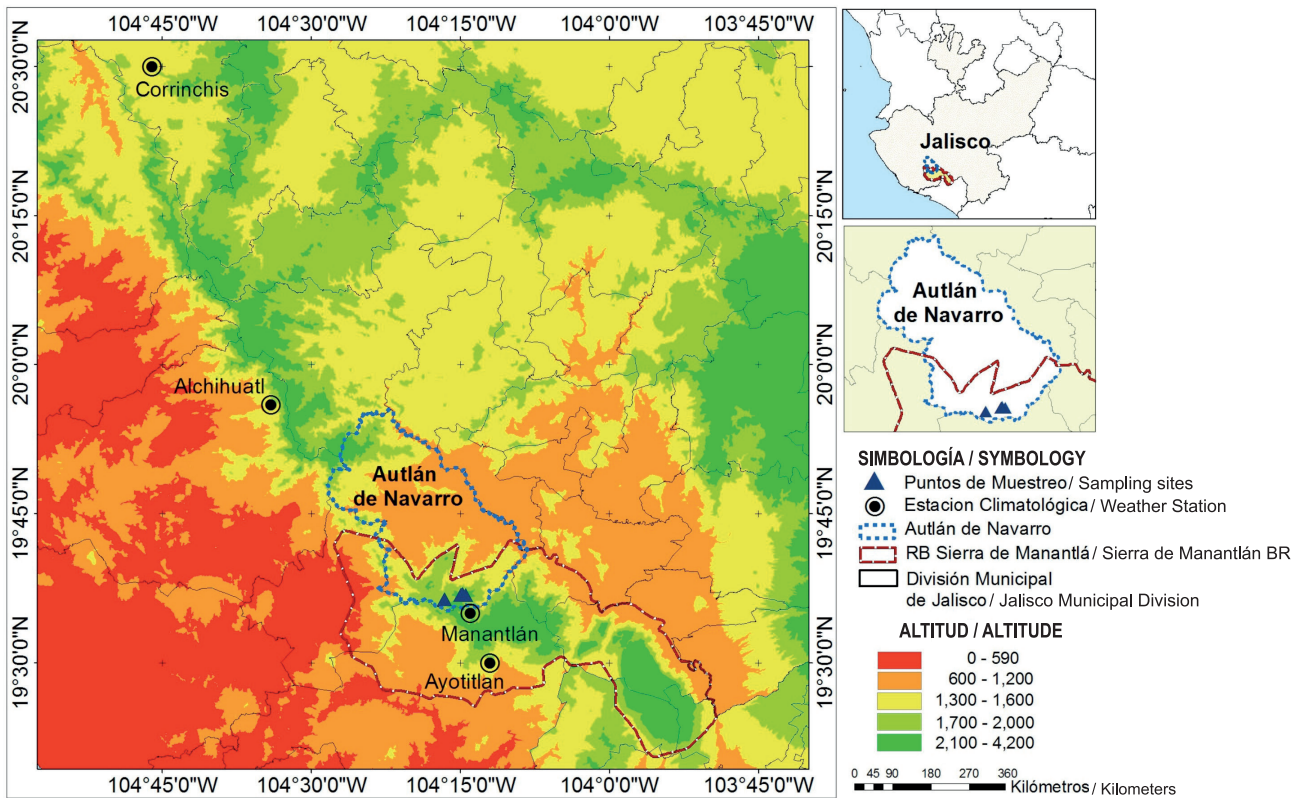


FIGURA 1. Localización geográfica de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, sitios de muestreo y estaciones climatológicas empleadas para el análisis dendroclimático.

FIGURE 1. Geographic location of the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, sampling sites and weather stations used for the dendroclimatic analysis.

siana, de los cuales se extrajeron de dos a tres núcleos de crecimiento (virutas) empleando taladro de Pressler (marca Haglof, Grupo Acción Forestal [GAFMEX], México). Las muestras se prepararon y preficharon acorde con los métodos dendrocronológicos (Stokes & Smiley, 1995). La medición de los anillos anuales se realizó con un micrómetro (VELMEX, modelo TA4030H1-S6, Velmex Inc., New York, USA) con platina de fase deslizante y precisión de 0.001 mm (Robinson & Evans, 1980). La calidad del fechado y medición de las series de crecimiento se verificaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las cronologías se generaron con el programa ARSTAN (Cook & Holmes, 1984), el cual realiza la estandarización de series de crecimiento, eliminando la varianza debido a los factores biológicos y maximizando la señal climática.

El índice de ancho de anillo (IAA) (cronología residual) y la precipitación regional se utilizaron para generar el siguiente modelo y reconstruir la variabilidad de la precipitación de la RBSM:

$$y_t = a + b \cdot x_t + \varepsilon$$

ording to dendrochronologic methods (Stokes & Smiley, 1995). The annual rings were measured with a micrometer (VELMEX, TA4030H1-S6 model, Velmex Inc., New York, USA) with a sliding-phase system and precision of 0.001 mm (Robinson & Evans, 1980). The dating and measurement quality of the growth series was checked with the Program COFECHA (Holmes, 1983). Chronologies were generated with the Arstan program (Cook & Holmes, 1984), which is used to standardize growth series, thereby eliminating the variance due to biological factors and maximizing the climate signal.

The ring width index (RWI) (residual chronology) and regional precipitation were used to generate the following model and reconstruct precipitation variability in the SMBR:

$$y_t = a + b \cdot x_t + \varepsilon$$

Where:

- y_t = Seasonal precipitation in year t
- x_t = Ring width index in year t

Donde:

y_t = Precipitación estacional (mm) en el año t
 x_t = Índice de ancho de anillo del año t
 a y b = Parámetros de regresión
 ε = Error experimental

La validación estadística se hizo calibrando el 50 % de los datos y verificándolos con el resto (Fritts, 1991). El análisis dendroclimático se hizo con los datos de precipitación de cuatro estaciones climáticas cercanas al área de estudio (Cuadro 1). Los datos se obtuvieron del programa ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica) (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2000). La precipitación reconstruida se suavizó (ajustando una curva decenal flexible) para resaltar periodos secos y húmedos. La magnificación de los periodos se realizó estandarizando y acumulando la precipitación, acorde con lo siguiente:

$$Z_i = ((x_i - x_{media})/s) + Z_{i+1}$$

Donde:

x_i = Valor de la precipitación (mm) en el año i
 x_{media} = Precipitación media (mm)
 s = Desviación estándar de la precipitación (mm) del periodo 1792-2010.

La influencia de eventos océano atmosféricos del ENSO (Niño/Niña) sobre la variabilidad de precipitación de la RBSM se determinó con el análisis de correlación lineal ($r = 95\%$) entre IAA y MEL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un total de 46 núcleos de crecimiento de 24 árboles de *P. douglasiana* se fecharon generando una cronología de 219

a and b = Regression parameters

ε = Experimental error

The statistics were verified by calibrating 50 % of the data and checking them with the rest (Fritts, 1991). The dendroclimatic analysis was performed with precipitation data from four weather stations near the study area (Table 1). The data were obtained from the ERIC III program (Rapid Weather Information Extractor, known by the Spanish acronym ERIC) (Mexican Institute of Water Technology [IMTA], 2000). The reconstructed precipitation was softened (fitted to a flexible 10-year curve) to highlight dry and wet periods. The periods were magnified by standardizing and accumulating the precipitation as follows:

$$Z_i = ((x_i - x_{mean})/s) + Z_{i+1}$$

Where:

x_i = Precipitation value (mm) in year i
 x_{mean} = Mean precipitation (mm)
 s = Standard deviation of the precipitation (mm) in the period 1792-2010.

The influence of ENSO (Niño/Niña) atmospheric ocean events on precipitation variability in the SMBR was determined by linear correlation analysis ($r = 95\%$) between RWI and MEL.

RESULTS AND DISCUSSION

A total of 46 growth cores taken from 24 *P. douglasiana* trees were dated, generating a 219 year chronology (1792-2010) with a correlation between series of $r = 0.4741$ ($P < 0.01$). The Program COFECHA indicates as a minimum acceptable correlation $r = 0.328$ ($P < 0.01$); therefore, the series shows a commonly-accepted climatic response (Holmes, 1983).

CUADRO 1. Estaciones climatológicas empleadas en el análisis dendroclimático de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México.

TABLE 1. Weather stations used in the dendroclimatic analysis of the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, Mexico.

Estación / Station	Latitud N (°) / Latitude N (°)	Longitud O (°) / Longitude W (°)	Altitud (m) / Altitude (m)	Periodo / Period	Datos (%) / Data (%)
Corrinchis	20.500	- 104.767	1,267	1961-2009	94.6
Alchihuatl	19.933	- 104.567	900	1969-1999	66.2
Manantlán	19.583	- 104.233	688	1965-1995	84.5
Ayotitlán	19.500	- 104.200	600	1961-1989	91.6

*Porcentaje de información disponible

*Percentage of information available

años (1792-2010) con una correlación entre series de $r = 0.4741$ ($P < 0.01$). El programa COFECHA indica como correlación mínima aceptable $r = 0.328$ ($P < 0.01$), por lo tanto, la serie muestra una respuesta climática común aceptable (Holmes, 1983).

Relación índice del ancho de anillo-precipitación instrumental

El IAA de *P. douglasiana* mostró una correlación positiva con la lluvia mensual. La correlación disminuyó significativamente desde enero ($r = 0.55$; $P < 0.001$) hasta mayo ($r = 0.19$; $P < 0.01$) (Figura 2A), incluso registrando correlación negativa ($r = -0.13$; $P < 0.1$) en noviembre. La precipitación estacional enero-mayo y el IAA mostraron la correlación más alta ($r = 0.72$; $P < 0.0001$) (Figura 2A y 2B). Lo anterior demuestra la influencia de la lluvia invernal sobre el crecimiento radial de *P. douglasiana*. La respuesta del crecimiento de coníferas a la lluvia invernal se ha discutido ampliamente en diversos estudios paleoclimáticos (Cerano et al., 2009, 2011a, 2012; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003; Díaz et al., 2002; Stahle & Cleaveland, 1993; Villanueva et al., 2009). La similitud observada entre el IAA y la precipitación (enero-mayo) en el periodo 1961-1996 (Figura 2C) indica que *P. douglasiana* tiene potencial para reconstruir la precipitación en la RBSM.

Modelo para la reconstrucción de la precipitación en la RBSM

El modelo generado para la reconstrucción de la precipitación fue altamente significativo ($P < 0.0001$); su calibración (1981-1996) y verificación (1961-1980) (Cuadro 2; Figura 3) mostraron alta significancia estadística ($P = 0.0001$). El IAA explicó desde 45 % hasta casi 60 % de la lluvia invierno-primavera. La prueba de signos indicó concordancia general para medias y desviaciones de precipitación instrumental y reconstruida ($P < 0.05$) (Fritts, 1991). La prueba t de Student para medias apareadas entre ambas precipitaciones indicó que no difieren significativamente en el periodo 1961-2010 ($t = 1.5^{07}$; $P = 1.000$). La validez estadística del modelo ($Y_t = -104.3682 + 161.7881 * X_t + \epsilon$) se verificó y aplicó para reconstruir la precipitación en la longitud total de la cronología (1792-2010).

La mayor similitud entre precipitación observada y reconstruida se registró en el periodo de calibración (Figura 3A), exceptuando eventos aislados como 1981, 1983 y 1987 (Figura 3B) y coincidiendo con eventos extremos del ENSO (Niños). Este mismo patrón ha sido reportado por Díaz et al. (2002).

Análisis de variabilidad de la precipitación reconstruida

El gráfico de precipitación reconstruida muestra severas sequías en los periodos 1792-1810, 1856-1864, 1870-1877, 1908-1925, 1941-1963, 1987-1991 y 1998-2005 (Figura 4A). La sequía de mediados del siglo XX (1941-1963) representa el evento más severo y prolongado (23 años) de los últimos

Ring width index-instrumental precipitation relationship

The RWI of *P. douglasiana* showed a positive correlation with monthly rainfall. The correlation decreased significantly from January ($r = 0.55$; $P < 0.001$) to May ($r = 0.19$; $P < 0.01$) (Figure 2A), even recording negative correlation ($r = -0.13$; $P < 0.1$) in November. The January-May seasonal precipitation and the RWI showed the highest correlation ($r = 0.72$; $P < 0.0001$) (Figure 2A and 2B). This demonstrates the influence of winter rainfall on root growth in *P. douglasiana*. The growth response of conifers to winter rainfall has been widely discussed in various paleoclimatic studies (Cerano et al., 2009, 2011a, 2012; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003; Díaz et al., 2002; Stahle & Cleaveland, 1993; Villanueva et al., 2009). The similarity observed between the RWI and precipitation (January-May) in the period 1961-1996 (Figure 2C) indicates that *P. douglasiana* has potential for reconstructing precipitation in the SMBR.

Model for reconstructing precipitation in the SMBR

The model generated for reconstructing precipitation was highly significant ($P < 0.0001$); its calibration (1981-1996) and verification (1961-1980) (Table 2; Figure 3) showed high statistical significance ($P = 0.0001$). The RWI explained from 45 % to almost 60 % of the winter-spring rainfall. The sign test indicated general agreement for means and deviations of instrumental and reconstructed precipitation ($P < 0.05$) (Fritts, 1991). The Student's t-test for paired means between both precipitations indicates that they did not differ significantly in the period 1961-2010 ($t = 1.5^{07}$; $P = 1.000$). The statistical validity of the model ($Y_t = -104.3682 + 161.7881 * X_t + \epsilon$) was verified and applied to reconstruct the precipitation over the chronology's total length (1792-2010).

The greatest similarity between observed and reconstructed precipitation was recorded in the calibration period (Figure 3A), except for isolated events such as those of 1981, 1983 y 1987 (Figure 3B) and coinciding with extreme ENSO events (Niños). This same pattern has been reported by Díaz et al. (2002).

Analysis of reconstructed precipitation variability

The reconstructed precipitation graph shows severe droughts in the periods 1792-1810, 1856-1864, 1870-1877, 1908-1925, 1941-1963, 1987-1991 and 1998-2005 (Figure 4A). The drought of the mid-twentieth century (1941-1963) was the most severe and prolonged event (23 years) of the last two centuries in the SMBR. Similarly, major events with above-average precipitation were observed in 1812-1818, 1831-1848, 1852-1855, 1904-1907, 1926-1932, 1964-1972, 1983-1984, 1996-1997 and 2006-2007. The results indicate that wet periods (as determined by Z_i) in the SMBR decreased in both intensity (from +9.0 to +3.0 S. D. of Z_i) and

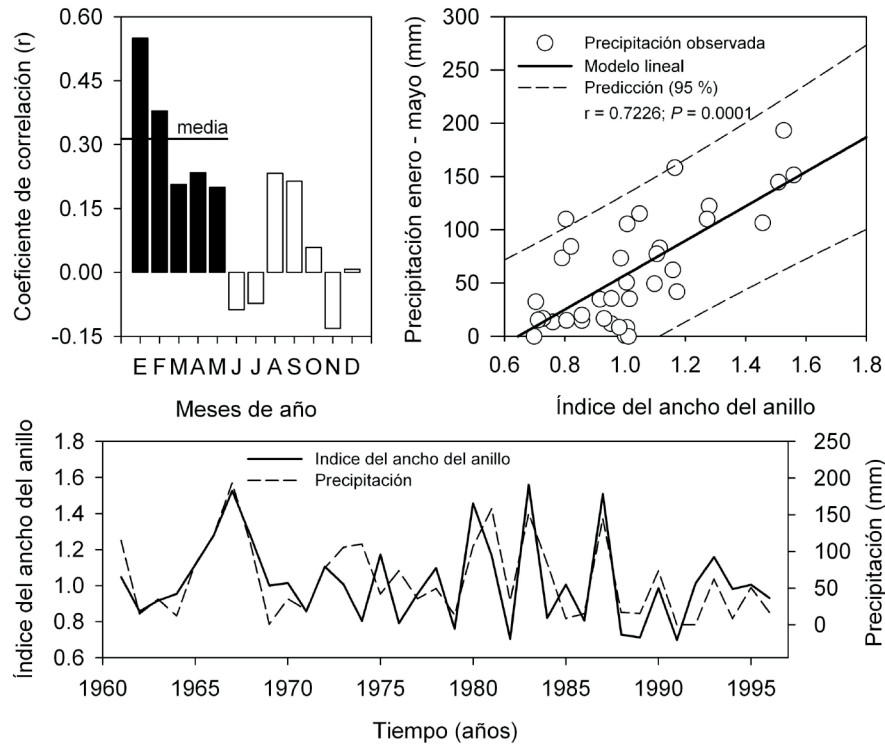


FIGURA 2. A) Correlación entre el índice del ancho del anillo de *Pinus douglasiana* y precipitación mensual en el periodo 1961-1996, B) Modelo lineal entre índice de anillo y precipitación estacional enero-mayo, C) Cronología de anillo y precipitación estacional en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México.

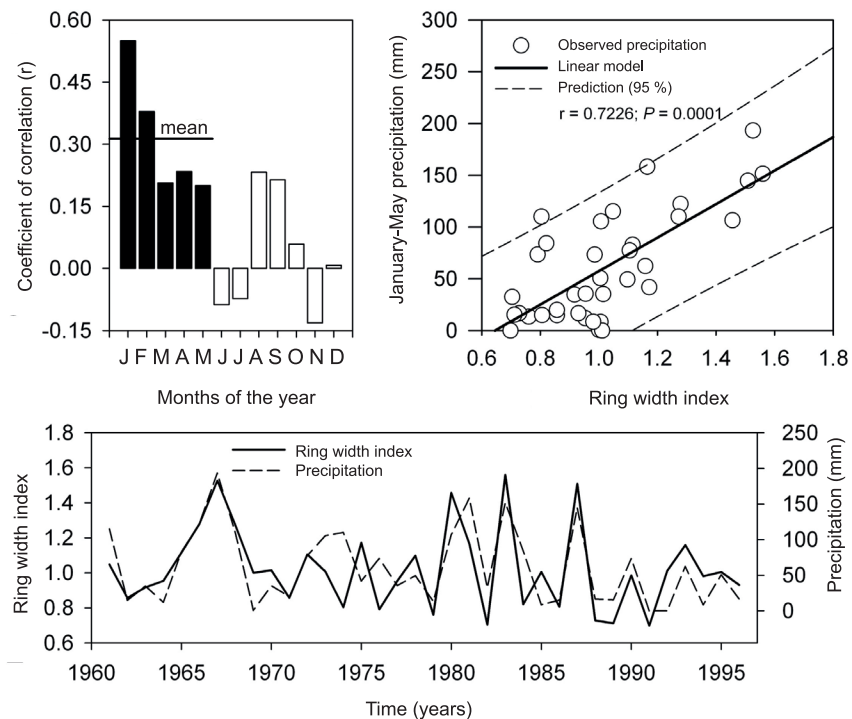


FIGURE 2. A) Correlation between the ring width index of *Pinus douglasiana* and monthly precipitation in the period 1961-1996, B) Linear model between ring index and January-May seasonal precipitation, C) Ring and seasonal precipitation chronology in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, México.

CUADRO 2. Calibración y verificación del modelo de regresión utilizado para reconstruir la precipitación invierno-primavera en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México.

TABLE 2. Calibration and verification of the regression model used to reconstruct the winter-spring precipitation in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, Mexico.

Periodo / Period	r	Parámetros de regresión / Regression parameters		Valor / Value t		Valor / Value P
		a	b	a	b	
Verificación / Verification	0.67	- 98.29 ± 44.63	158.15 ± 41.73	- 2.20	3.78	0.0001
Calibración / Calibration	0.77	- 107.39 ± 37.00	162.00 ± 36.33	- 2.90	4.45	0.0001
Total	0.72	- 104.36 ± 27.79	161.78 ± 26.54	- 3.75	6.09	0.0001

r = Coeficiente de correlación; a y b = Parámetros del modelo de regresión. ± Error estándar.

r = Coefficient of correlation; a and b = Regression model parameters. ± Standard error.

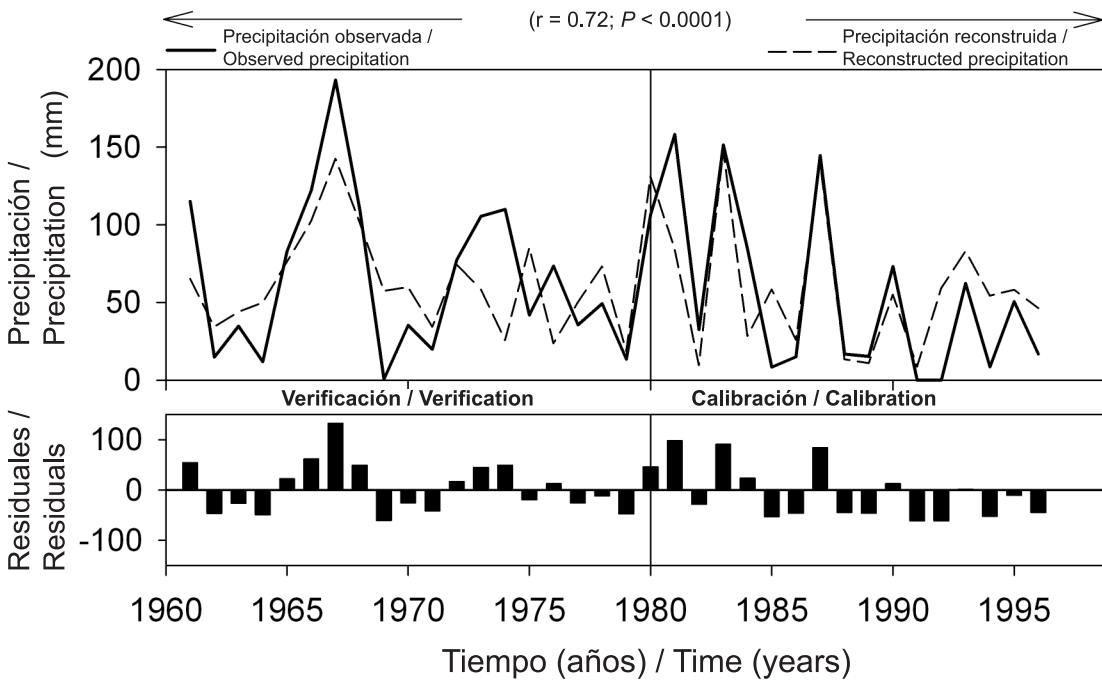


FIGURA 3. A) Relación entre precipitación observada y reconstruida y B) Distribución de residuales en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México.

FIGURE 3. A) Relationship between observed and reconstructed precipitation and B) Distribution of residuals in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, Mexico.

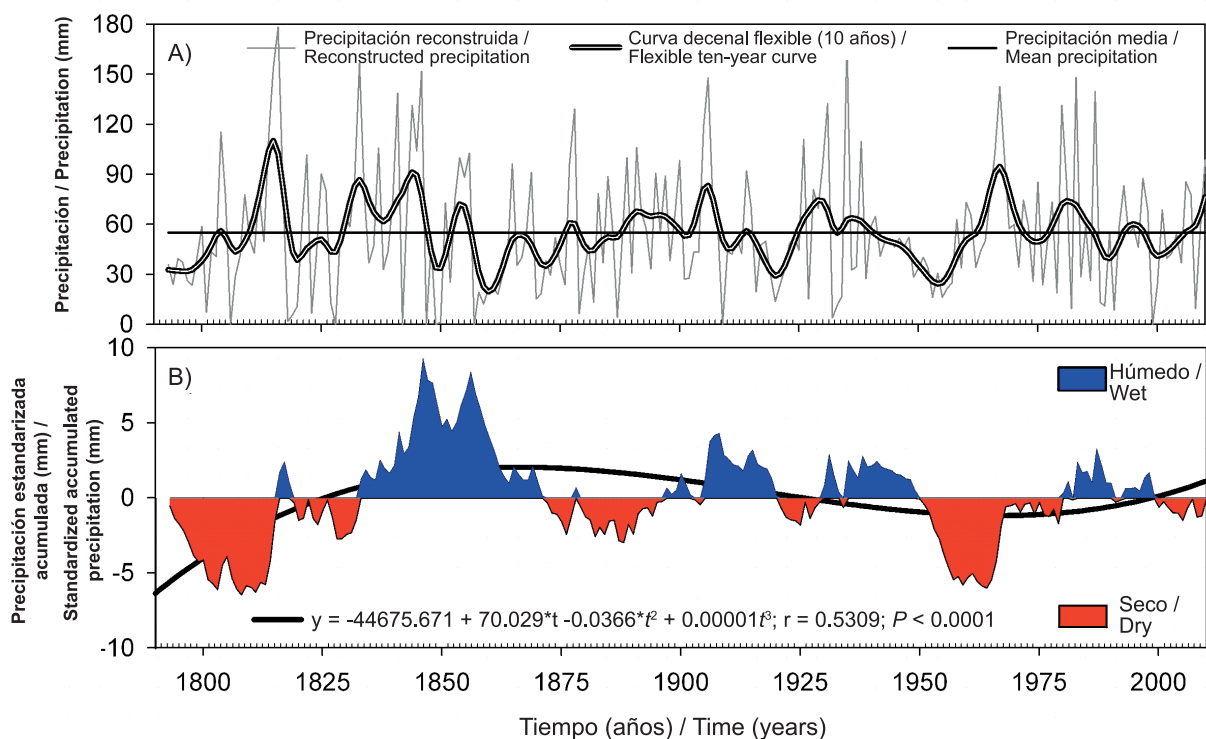


FIGURA 4. A) Reconstrucción de precipitación invierno-primavera y B) Precipitación estandarizada acumulada en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México. La precipitación estandarizada acumulada muestra el efecto de persistencia tanto de eventos secos como húmedos, propiciando un desfase de los periodos.

FIGURE 4. A) Reconstruction of winter-spring precipitation and B) Standardized accumulated precipitation in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, Mexico. Standardized accumulated precipitation shows the persistence of both dry and wet events, leading to a lag in the periods.

dos siglos en la RBSM. De igual manera se observan importantes eventos con precipitación por arriba de la media (1812-1818, 1831-1848, 1852-1855, 1904-1907, 1926-1932, 1964-1972, 1983-1984, 1996-1997 y 2006-2007). Los resultados indican que los periodos húmedos (determinados por Z_i) en la RBSM disminuyeron tanto en intensidad (de +9.0 hasta +3.0 D. E. de Z_i) como en duración (de 35 hasta 10 años) y que los eventos secos intensos (de -5 hasta -2.5 D. E. de Z_i) y prolongados (> 25 años) se registraron aproximadamente cada 55 años (Figura 4B). Este comportamiento es similar al registrado en el noreste de México (Cerano et al., 2011b).

La sequía de 1792-1810 ocasionó carencia de granos básicos y epidemias en la población (Florescano, 1980; García, Pérez, & Molina, 2003). Algunos estudios dendroclimáticos desarrollados para el centro (Therrell, Stahle, Villanueva, Cornejo, & Cleaveland, 2006) y norte de México (Cerano et al., 2011a; Constante, Villanueva, Cerano, Cornejo, & Valencia, 2009) indican severidad de sequías en el mismo periodo evidenciando un fenómeno climático generalizado.

La sequía de 1941-1963 ha sido considerada la más crítica del siglo XX en el país por su severidad e impacto negativo

duration (from 35 to 10 years) and that the intense dry (from -5 to -2.5 S. D. of Z_i) and prolonged (> 25 years) events were recorded about every 55 years (Figure 4B). This behavior is similar to that recorded in northeastern Mexico (Cerano et al., 2011b).

The 1792-1810 drought resulted in a lack of basic grains and epidemics in the population (Florescano, 1980; García, Pérez, & Molina, 2003). Some dendroclimatic studies carried out for central Mexico (Therrell, Stahle, Villanueva, Cornejo, & Cleaveland, 2006) and the north of the country (Cerano et al., 2011a; Constante, Villanueva, Cerano, Cornejo, & Valencia, 2009) indicate severe droughts in the same period, demonstrating a widespread climatic phenomenon.

The 1941-1963 drought has been considered the most critical of the twentieth century in the country for its severity and negative impact (social and economic), since it led to widespread famine and emigration from the countryside to the city, even to the United States (Florescano, 1980; García et al., 2003). The drought was noteworthy for its area, as it was reported in much of the Mexican republic (Cerano et al., 2011b; Cleaveland et al., 2003; Díaz et al., 2002; Therrell et al., 2006; Villanueva et al., 2009),

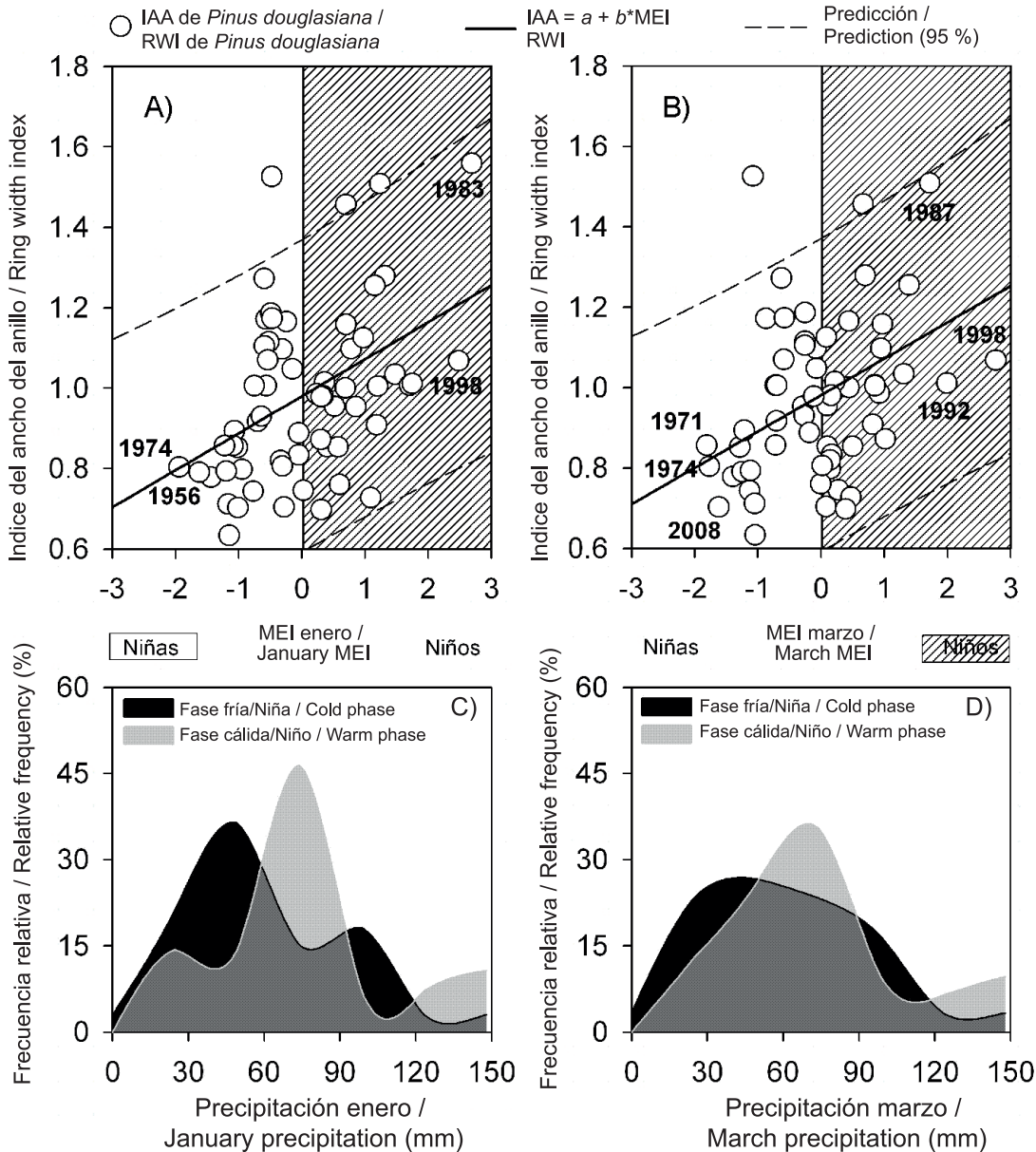


FIGURA 5. Relación entre el índice de ancho de anillo de *Pinus douglasiana* e Índice Multivariado del ENSO (MEI) de enero (A) y marzo (B) e histograma de precipitación con relación a la fase cálida/fría del fenómeno del ENSO de enero (C) y marzo (D).

FIGURE 5. Relationship between the ring width index of *Pinus douglasiana* and the Multivariate ENSO Index (MEI) of January (A) and March (B) and precipitation histogram relative to the warm/cold phase of the ENSO phenomenon of January (C) and March (D).

(social y económico), ya que provocó hambruna generalizada y emigración del campo a la ciudad, incluso hacia Estados Unidos de América (Florescano, 1980; García et al., 2003). La sequía destacó por su extensión, pues se reportó en gran parte de la república mexicana (Cerano et al., 2011b; Cleaveland et al., 2003; Díaz et al., 2002; Therrell et al., 2006; Villanueva et al., 2009), con lo cual evidenció que este tipo de fenómenos modulan el clima a gran escala.

demonstrating that this type of phenomenon modulates the climate on a large scale.

ENSO influence on the SMBR climate

The correlation between the RWI of *P. douglasiana* and the MEI was highly significant ($r = 0.4542$; $P < 0.0002$) in the January-June period; individually, January ($r = 0.4337$; $P < 0.0001$) and

Influencia del ENSO sobre el clima de la RBSM

La correlación entre el IAA de *P. douglasiana* y el MEI fue altamente significativa ($r = 0.4542$; $P < 0.0002$) en los meses de enero a junio; individualmente, enero ($r = 0.4337$; $P < 0.0001$) y marzo ($r = 0.4309$; $P < 0.0001$) presentaron la correlación más alta. Los eventos intensos de ENSO (Niños: 1983, 1987, 1992 y 1998) están relacionados directamente con mayor amplitud de las series de crecimiento de *P. douglasiana*, y viceversa con los eventos La Niña (1956, 1971, 1974 y 2008) (Figura 5A y 5B).

Los regímenes de lluvia mayores que el promedio y más frecuentes fueron registrados durante la fase cálida del ENSO (Niño) en algunos meses del año (Figura 5C y 5D), al contrario de lo que ocurre en el noreste de México. Al igual que en este estudio, varios autores (Díaz et al., 2002; Stahle & Cleaveland, 1993; Trenberth, 1997) consideran que ENSO es el factor más importante de la variación climática interanual en México.

CONCLUSIONES

Los anillos de crecimiento de *P. douglasiana* son un “proxy” que permitieron reconstruir la variabilidad hidroclimática de los últimos 219 años en la RBSM. Los periodos húmedos están disminuyendo tanto en intensidad como en duración, mientras que los periodos secos extremos muestran patrones temporales recurrentes (cada 55 años) similares a los del noreste de México. En la RBSM, El Niño contribuye significativamente con precipitaciones mayores que el promedio, mientras que La Niña propicia condiciones inversas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento SEP-CONACYT a través del proyecto “Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México”. Gracias a la RBSM por permitirnos el acceso, al doctor Enrique Jardel Peláez por el apoyo para el desarrollo del estudio, y a Omar Durán Guerra y Vicenta Constante García por su valiosa ayuda en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, A. J. G., Sánchez, C. I., & Valdéz, C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–35. Obtenido de http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/15.2/MB_2009-15-2_027-044.pdf
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., & Constante, G. V. (2011a). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 33–46. Obtenido de http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/vol2_no4.pdf

March ($r = 0.4309$; $P < 0.0001$) presented the highest correlation. The intense ENSO events (Niños: 1983, 1987, 1992 and 1998) are directly related to the greater width of the growth series of *P. douglasiana*, and viceversa with the La Niña events (1956, 1971, 1974 y 2008) (Figure 5A and 5B).

The more frequent and higher than average rainfall regimes were recorded during the ENSO warm phase (Niño) in some months of the year (Figure 5C and 5D), unlike what happens in northeastern Mexico. As in this study, several authors (Díaz et al., 2002; Stahle & Cleaveland, 1993; Trenberth, 1997) consider ENSO to be the most important factor in interannual climate variability in Mexico.

CONCLUSIONS

Growth rings of *P. douglasiana* are a “proxy” that allowed reconstructing the hydroclimatic variability of the last 219 years in the SMBR. The wet periods are decreasing in both intensity and duration, while the extreme dry periods show recurring temporal patterns (every 55 years) similar to those in northeastern Mexico. In the SMBR, El Niño contributes significantly to higher than average rainfall, while La Niña leads to opposite conditions

ACKNOWLEDGMENTS

This research was made possible thanks to SEP-CONACYT funding through the project “Study of the climate-fire relationship in north-central Mexico.” Thanks also go to the SMBR for allowing us access to the area, to Dr. Enrique Jardel Peláez for his support in developing the study, and to Omar Durán Guerra and Vicenta Constante García for their valuable assistance in the fieldwork.

- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., & Estrada, A. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7–23. Obtenido de http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/vol3_no10.pdf
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdéz, C. R. D., Méndez, G. J., & Constante, G. V. (2011b). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235–249. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=263121431006>
- Cleaveland, K. M., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva, D. J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369–388. doi: 10.1023/a:1024835630188
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo O. E. H., & Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17–39. Obtenido de http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/julio_dic2009.pdf
- Cook, E. R., & Holmes R. L. (1984). *Program ARSTAN and users manual*. Tucson, AZ, USA: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- Díaz, C. S., Therrell, M. D., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22(3), 237–244. Obtenido de <http://www.int-res.com/articles/cr2002/22/c022p237.pdf>
- Florescano, E. M. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México, D. F.: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Fritts, H. C. (1991). *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. Tucson, AZ, USA: University of Arizona Press.
- García A. V., Pérez, Z. J. M., & Molina del V. A. (2003). *Desastres agrícolas en México. Catalogo histórico. Tomo I. Épocas prehispánica y colonial (958-1822)*. México, D.F.: CIESAS.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Obtenido de http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBvol43_69-78.pdf
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2000). *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*. Software. Jiutepec, Morelos, México: Autor.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2000). *Programa de manejo forestal de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán*. (1a. ed.). México, D. F.: Autor. Obtenido de <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/181.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2003). *Marco geoestadístico. Información geográfica de Autlán de Navarro, Jalisco*. México: Autor.
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59–64. Obtenido de http://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBvol40_59-64.pdf
- Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (1993). Southern oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6, 129–140. Obtenido de [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200442\(1993\)006%3C0129%3ASOERFT%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200442(1993)006%3C0129%3ASOERFT%3E2.0.CO%3B2)
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Burnette, J., Cerano, P. J., Heim, R. R. Jr., Fye, F. K.,...Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38, 1–4. doi: 10.1029/2010GL046472
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1995). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, AZ, USA: University of Arizona Press.
- Therrell, D. M., Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Cornejo, O. E., & Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climate Change*, 74(4), 493–504. doi: 10.1007/s10584-006-6865-z
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2777. Obtenido de [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C2771%3ATDOENO%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477(1997)078%3C2771%3ATDOENO%3E2.0.CO%3B2)
- Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Cerano, P. J., Estrada, A. J., & Sánchez, C. I. (2009). Reconstrucción de precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105), 37–69. Obtenido de http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/enero_junio2010.pdf