

Chihuahua southwestern hydroclimatic variability inferred with coniferous growth rings

Variabilidad hidroclimática del suroeste de Chihuahua inferida con anillos de crecimiento de coníferas

José Villanueva-Díaz^{1*}; Luis U. Castruita-Esparza²; Aldo R. Martínez-Sifuentes¹; Roberto Loera-Chaparro³; Juan Estrada-Ávalos¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Margen derecho Canal del Sacramento km 6.5, zona industrial 4.^a etapa. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

²Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. km 2.5 Carretera Delicias a Rosales. C. P. 33000. Delicias, Chihuahua, México.

³Universidad Tecnológica de la Tarahumara. Carretera Guachochi-Yokivo km 1.5, col. Turuseachi. C. P. 33180. Guachochi, Chihuahua, México.

*Corresponding author: jvilladi@prodigy.net.mx, tel.: +52 (871) 159 0104.

Abstract

Introduction: The forest management unit 0807 (UMAFOR 0807) is one of the most productive in timber and water resources provision, but there are no studies of historical hydroclimatic variability and its trends for predictive purposes.

Objective: to generate a precipitation reconstruction through a regional dendrochronological network for the southwest of the state of Chihuahua.

Materials and methods: a network of growth series of five distinctive conifers of UMAFOR 0807 was developed; through Principal Component Analysis the series with the greatest common variance were defined to obtain a representative chronology. The reconstruction model was generated with a series of regional precipitation. The general circulation modes with the greatest impact on rainfall variability and the association of the total ring-width index with the drought indices were analyzed.

Results and discussion: From eight chronologies generated, six showed a common climate response to integrate a regional representative series, which responded to September-July precipitation. The correlation between the total ring-width index and the Palmer Drought Severity Index (PDSI) was 0.68 ($P < 0.01$) in the June-August period, and 0.71 ($P < 0.01$) for the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for August of the previous year to June of the current year of growth. The reconstructed precipitation showed significance in spectral peaks of 2.1 and 2.8 years, corresponding to the influence of ENSO (El Niño–Southern Oscillation).

Conclusions: the dendrochronological network composed of various tree species and integrated in a regional chronology allowed to capture the interannual and multiannual variability of the climate.

Keywords:

Dendrochronological network; drought indices; atmospheric phenomena; climate reconstruction; precipitation.

Resumen

Introducción: La Unidad de Manejo Forestal 0807 (UMAFOR 0807) es una de las más productivas en madera y provisión de recursos hídricos, pero no existen estudios de la variabilidad hidroclimática histórica y de sus tendencias para fines predictivos.

Objetivo: Generar una reconstrucción de precipitación mediante una red dendrocronológica regional para el suroeste del estado de Chihuahua.

Materiales y métodos: Una red de series de crecimiento de cinco coníferas distintivas de la UMAFOR 0807 se desarrolló; mediante componentes principales se definieron las series con mayor varianza común para la obtención de una representativa. El modelo de reconstrucción se generó con una serie de precipitación regional. Se analizaron los modos de circulación general con mayor impacto en la variabilidad de lluvia y la asociación del índice de anillo total con los índices de sequía.

Resultados y discusión: De ocho cronologías generadas, seis mostraron una respuesta climática común para integrar una serie representativa regional, la cual respondió a la precipitación septiembre-julio. La correlación entre el índice de anillo total e Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) fue 0.68 ($P < 0.01$) en el periodo junio-agosto, y 0.71 ($P < 0.01$) para el Índice Estandarizado de Precipitación Evaporación (SPEI) de agosto del año previo a junio del año actual de crecimiento. La precipitación reconstruida mostró significancia en picos espectrales de 2.1 y 2.8 años, que corresponden a la influencia de ENSO (El Niño Oscilación del Sur).

Conclusiones: La red dendrocronológica compuesta por diversas especies arbóreas e integrada en una cronología regional permitió captar la variabilidad interanual y multianual del clima.

Palabras clave:

Red dendrocronológica; índices de sequía; fenómenos atmosféricos; reconstrucción climática; precipitación.

Introduction

The southwestern region of the state of Chihuahua, in the Sierra Madre Occidental (SMO), is an area of importance for forestry, biodiversity and the production of hydrological services (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). The forest management region of Guachochi, A.C. is located in this area, to which the forest management unit 0807 (UMAFOR 0807) involving the municipalities of Guachochi, Balleza, Batopilas, Urique, Guadalupe y Calvo, Nonoava and Rosario correspond, with a total area of 978 380 ha (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2009). In this region, mixed coniferous forests dominated by *Pinus* species of timber interest favor commercial exploitation, whose volumetric stocks are estimated at 60 million m³. The municipality of Guachochi owns 61.1 % of the total stocks of UMAFOR 0807, which is why it is considered one of the largest contributors for the state of Chihuahua to occupy the first places in the supply of volumes, which in some years reaches up to 1.2 million m³. At the same time, another aspect that occurs in the region, which covers 66 % of the state of Chihuahua, is the provision of water resources to both the Hydrological Region Bravo-Conchos (RH-24) and the Hydrological Region 10 (RH-10). The latter provides water resources to the irrigation districts of the state of Sinaloa through the basins of the Culiacan, Sinaloa and Fuerte rivers. The volumes of water produced in the region are approximately 3 800 million m³, of which about 693 million m³ are used for agricultural, livestock and domestic purposes (CONAGUA, 2018).

Changes in land use caused by intensive forest use and overgrazing, among other disturbances of anthropogenic origin, affect the hydrological cycle and, therefore, the drained volumes (Descroix, Nouvelot, & Vauclin, 2002). Based on the above, the determination of interannual and multiannual climate variability, its trends and the impact on water availability, as well as the influence that global warming may have in the region, is paramount (Feng & Fu, 2013).

Several precipitation reconstructions have been performed for some areas of Chihuahua (Diaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; Irby, Fulé, Yocom, & Villanueva, 2013; Villanueva et al., 2015a); however, there is still no information for the southwest of the state, particularly in UMAFOR 0807. Such information is important to define the impact that climate variability could have on biomass production of commercial species that, apparently, would be affected by climate change, as has already been determined for certain species in Chihuahua (Bickford, Fulé, & Kolb, 2011; Castruita-Esparza et al., 2019).

The objective of this study was to develop a climate reconstruction with dendrochronological series

Introducción

La región suroeste del estado de Chihuahua, en la Sierra Madre Occidental (SMO), constituye un área de importancia forestal, de biodiversidad y de producción de servicios hidrológicos (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). En esta zona se encuentra la Región de Manejo Silvícola de Guachochi, A. C., a la que corresponde la Unidad de Manejo Forestal 0807 (UMAFOR 0807) que involucra los municipios de Guachochi, Balleza, Batopilas, Urique, Guadalupe y Calvo, Nonoava y Rosario, con una superficie total de 978 380 ha (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2009). En esta región, los bosques mixtos de coníferas con dominancia de especies de *Pinus* de interés maderable favorecen la explotación comercial, cuyas existencias volumétricas se estiman en 60 millones de m³ rollo. El municipio de Guachochi posee 61.1 % de las existencias totales de la UMAFOR 0807, por lo cual se considera uno de los de mayor contribución para que el estado de Chihuahua ocupe los primeros lugares en la provisión de volúmenes en rollo, que en algunos años alcanza hasta 1.2 millones de m³. Al mismo tiempo, otro de los aspectos que ocurren en la región, que abarca 66 % del estado de Chihuahua, es la provisión de recursos hídricos tanto a la Región Hidrológica Bravo-Conchos (RH-24) como a la Región Hidrológica 10 (RH-10). Esta última proporciona recursos hídricos a los distritos de riego del estado de Sinaloa a través de las cuencas de los ríos Culiacán, Sinaloa y Fuerte. Los volúmenes de agua producidos en la región son de aproximadamente 3 800 millones de m³, de los que escurren cerca de 693 millones de m³ utilizados con fines agrícola, pecuario y doméstico (CONAGUA, 2018).

Los cambios en el uso del suelo originados por el aprovechamiento intensivo del bosque y sobrepastoreo, entre otros disturbios de origen antropogénico, impactan el ciclo hidrológico y, por ende, los volúmenes escurridos (Descroix, Nouvelot, & Vauclin, 2002). Con base en lo anterior, la determinación de la variación climática interanual y multianual, sus tendencias y el impacto en la disponibilidad hídrica, así como la influencia que el calentamiento global pudiera tener en la región, resulta primordial (Feng & Fu, 2013).

Diversas reconstrucciones de precipitación se han realizado para algunas áreas de Chihuahua (Diaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; Irby, Fulé, Yocom, & Villanueva, 2013; Villanueva et al., 2015a); sin embargo, aún no existe información para el suroeste del estado, particularmente en la UMAFOR 0807. Tal información es importante para definir el impacto que la variabilidad climática pudiera ejercer en la producción de biomasa de especies comerciales que, en apariencia, se verían afectadas por el cambio climático, como ya se ha determinado para ciertas especies en Chihuahua (Bickford, Fulé, & Kolb, 2011; Castruita-Esparza et al., 2019).

distributed in the southwest of Chihuahua and that have influence on the volumes of water that drains to the irrigation districts in the state of Sinaloa and to the eastern slope of the Conchos river basin. In addition, the influence that general circulation modes exert on historical climate behavior was determined, and the possible relationship between drought indices, such as the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and the Palmer Drought Severity Index (PDSI), and regional dendrochronological indices was analyzed.

Materials and methods

Study area

The study area is located in the mixed temperate forest of the SMO in the southwest of Chihuahua (Figure 1). The dominant climate is of the types C(E) w_1 , C(E) w_2 and C(E) $w_2(x')$, which correspond to semi-cold climates, sub-humid with summer rains, subtype of medium humidity, where the winter precipitation is greater than 10.2 % (García, 2004). The average annual precipitation is 700 mm with fluctuations between 400 and 1 100 mm (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2013). The area is dominated by acidic and basic extrusive igneous rocks that give rise to soils classified as regosols; the dominant vegetation is pine

El objetivo de este estudio fue desarrollar una reconstrucción climática con series dendrocronológicas distribuidas en el suroeste de Chihuahua y que tienen influencia en los volúmenes de agua que drenan hacia los distritos de riego en el estado de Sinaloa y hacia la vertiente oriental de la cuenca del río Conchos. Adicionalmente, se determinó la influencia que los modos de circulación general ejercen sobre el comportamiento histórico del clima y se analizó la posible relación entre los índices de sequía, como el Índice Estandarizado de Precipitación Evaporación (SPEI) y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), y los índices dendrocronológicos regionales.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en los parajes del bosque templado mixto de la SMO en el suroeste de Chihuahua (Figura 1). El clima dominante es de los tipos C(E) w_1 , C(E) w_2 y C(E) $w_2(x')$, que corresponden a climas semifríos, subhúmedos con lluvias de verano, subtipo de humedad media, donde la precipitación invernal es mayor de 10.2 % (García, 2004). La precipitación media anual es de 700 mm con fluctuaciones entre 400 a 1 100 mm (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2013). En el área dominan rocas ígneas

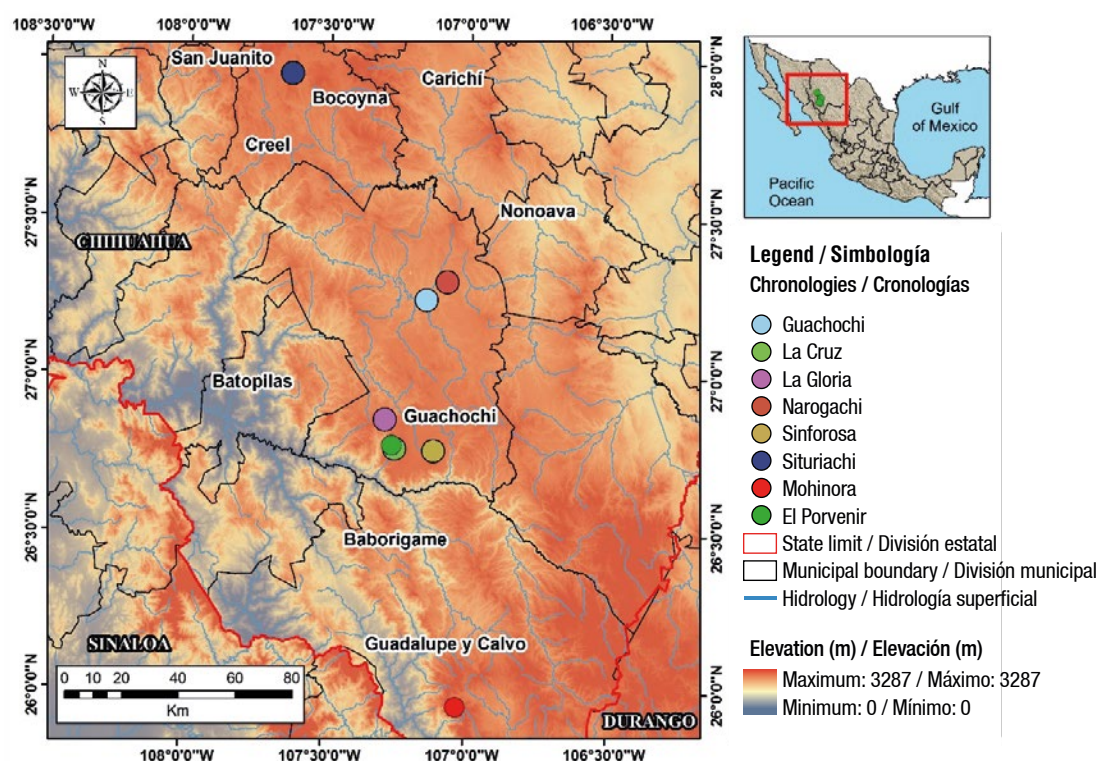


Figure 1. Geographic location of dendrochronological sampling sites on the Sierra Madre Occidental watershed in the southwest of the state of Chihuahua, Mexico.

Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo dendrocronológico sobre el parteaguas de la Sierra Madre Occidental en el suroeste del estado de Chihuahua, México.

forest (50 %), followed by pine-oak (12 %) and the rest by oak woodlands, oak-pine forests, grasslands, and crop growing areas (CONAFOR, 2009).

Sampling of growth cores

Eight sampling sites were located in the southwest of the state of Chihuahua; the selected sites have mixed temperate forest vegetation dominated by pine and oak species; in two of them *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald dominates, three more with *Pinus arizonica* Engelm., one with *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., and two with *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Table 1). In regional studies, the integration of various species in a basin or hydrological region allows to capture hydroclimatic fluctuations with greater accuracy and substantiate the influence that global circulatory phenomena exert (Woodhouse & Lukas, 2006).

The sampling of the trees was selective and obtained from two to three increment cores per tree; the cross sections were obtained from dead trees or stumps from previous logging. The number of trees sampled per site fluctuated between 40 and 60 individuals. The samples were processed in the *Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP) according to conventional dendrochronological methods (Stokes & Smiley, 1968). The quality of the dating of the series was determined with the COFECHA program (Holmes, 1983) and the process of standardization of the series to obtain total ring width, earlywood width and latewood width (RW, EW and LW, respectively) was performed with the ARSTAN program (Cook, 1987). The quality of the dendrochronological series was based on the values of series intercorrelation, mean sensitivity and signal-to-noise ratio (Fritts, 1976).

extrusivas ácidas y básicas que dan origen a suelos clasificados como regosoles; la vegetación dominante es de bosque de pino (50 %), seguido por pino-encino (12 %) y el resto por encinares, bosques de encino-pino, pastizales y áreas de cultivo (CONAFOR, 2009).

Muestreo de núcleos de crecimiento

En el suroeste del estado de Chihuahua se ubicaron ocho sitios de muestreo; los parajes seleccionados poseen vegetación de bosque mixto templado con dominancia de especies de pino y encino; en dos de ellos domina *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald, tres más con *Pinus arizonica* Engelm., uno con *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. y dos con *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Cuadro 1). En estudios regionales, la integración de diversas especies en una cuenca o región hidrológica permite captar las fluctuaciones hidroclimáticas con mayor veracidad y fundamentan la influencia que los fenómenos circulatorios de carácter global ejercen (Woodhouse & Lukas, 2006).

El muestreo del arbolado fue selectivo y se obtuvieron de dos a tres núcleos de crecimiento por árbol; las secciones transversales se obtuvieron de árboles muertos o tocones de aprovechamientos previos. El número de árboles muestreados por sitio fluctuó entre 40 y 60 individuos. Las muestras se procesaron en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) acorde con los métodos dendrocronológicos convencionales (Stokes & Smiley, 1968). La calidad del fechado de las series se determinó con el programa COFECHA (Holmes, 1983) y el proceso de estandarización de las series para obtener anillo total, madera temprana y madera tardía (RW, EW y LW, respectivamente) se

Table 1. Geographic location of study sites in the southwest of the state of Chihuahua.

Cuadro 1. Localización geográfica de sitios de estudio en el suroeste del estado de Chihuahua.

Site/ Sitio	Key/ Clave	North latitude/ Latitud norte	West Greenwich Longitude/ Longitud Oeste de Greenwich	Elevation (m)/ Elevación (m)	Sampled species/ Especie muestreada
Guachochi	GUA	27° 14' 48"	107° 08' 50.5"	2 113	<i>Pinus lumholtzii</i>
Narogachi	NAR	27° 18' 12"	107° 04' 29.0"	2 285	<i>P. lumholtzii</i>
La Cruz	LAC	26° 46' 20"	107° 15' 14.0"	2 495	<i>Pinus arizonica</i>
Porvenir	POR	26° 48' 52"	107° 15' 49.1"	2 495	<i>P. arizonica</i> + <i>Abies durangensis</i>
Sinforosa	SIN	26° 45' 59"	107° 06' 55.0"	2 490	<i>Pinus leiophylla</i>
La Gloria	GLO	28° 51' 52"	107° 17' 21.6"	2 313	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Situriachi	SIT	27° 57' 35"	107° 38' 20.3"	2 412	<i>P. arizonica</i>
Cerro Mohinora	MOH	25° 57' 16"	107° 01' 38.0"	2 900	<i>P. menziesii</i>

To analyze the common climate response between the series, a simple correlation and a Principal Component Analysis were developed to determine the series with the same variability (those loaded in the first principal component and with high correlation), in order to generate a series with regional representativeness. From each dendrochronological series gridded precipitation was obtained from the area closest to the collection site, based on records and estimated values of rain from CONAGUA and covering the period 1950-2015; the grids selected were 42985, 42986, 43304, 44586, 44906 and 42140 (Terán, 2010). Rainfall records were averaged at a monthly level to generate a regional series of precipitation representative of the southwest of Chihuahua.

The response function between the regional total ring-width chronology and the average rainfall series was analyzed using both the DENDROCLIM program (Biondi & Weikull, 2004) and simple correlations, considering a seasonal period of 18 months of rain (six months prior to the year of growth and 12 months during the year of growth). The cumulative precipitation of the seasonal period with significant association ($P < 0.01$) was correlated with the total ring-width indices in their standard and residual version and a linear model was generated for reconstruction purposes.

The generated model was calibrated in half of the climate records and verified in the other half, using the *Verify* subroutine of the Dendrochronology Program Library of the University of Arizona (Holmes, 2001). The calibrated and verified regression equation was used in seasonal rain reconstruction, to which a flexible ten-year spline was adjusted to highlight high and low frequency events (Esper, Cook, Krusk, Peters, & Schweingruber, 2003); a Power Spectrum Analysis was also performed to determine the presence of significant frequencies (Bunn et al., 2018).

The reconstructed precipitation series was correlated with El Niño Southern Oscillation (ENSO) indices such as the Southern Oscillation Index (SOI), the Multivariate ENSO Index (MEI) and the Tropical Rainfall Index (TRI) (Wolter & Timlin, 2011; Wright, 1979), as well as with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) (Mantua, 2017) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) indices (Endfield, Mestas-Núñez, & Trimble, 2001).

In order to determine whether the annual growths of the tree species involved are a proxy for the intensity and duration of documented historical droughts in the region, the total ring growth series was related to drought indices such as the Reconstructed Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Stahle et al., 2016) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010).

realizó con el programa ARSTAN (Cook, 1987). La calidad de las series dendrocronológicas se fundamentó en los valores de intercorrelación entre series, sensibilidad media y relación señal/ruido (Fritts, 1976).

Para analizar la respuesta climática común entre las series, un análisis de correlación simple y un análisis de componentes principales se desarrollaron para determinar las series con una misma variabilidad (aquellas cargadas en el primer componente y con alta correlación), con la finalidad de generar una serie con representatividad regional. De cada serie dendrocronológica se obtuvo una malla de precipitación del área más cercana al sitio de colecta, fundamentada en registros y valores estimados de lluvia de la CONAGUA y que cubren el periodo 1950-2015; las mallas seleccionadas fueron 42985, 42986, 43304, 44586, 44906 y 42140 (Terán, 2010). Los registros de lluvia se promediaron a nivel mensual para generar una serie regional de precipitación representativa del suroeste de Chihuahua.

La función de respuesta entre la cronología regional de anillo total y la serie promedio de precipitación se analizaron tanto con el programa DENDROCLIM (Biondi & Weikull, 2004) como mediante correlaciones simples, al considerar un periodo estacional de 18 meses de lluvia (seis meses previos al año de crecimiento y 12 meses durante el año de crecimiento). La precipitación acumulada del periodo estacional con asociación significativa ($P < 0.01$) se correlacionó con los índices de anillo total en su versión estándar y residual y se generó un modelo lineal con fines de reconstrucción.

El modelo generado se calibró en la mitad de los registros climáticos y se verificó en la otra mitad, mediante la subrutina *Verify* de la librería de programas dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (Holmes, 2001). La ecuación de regresión calibrada y verificada se utilizó en la reconstrucción de lluvia estacional, a la cual se ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de alta y baja frecuencia (Esper, Cook, Krusk, Peters, & Schweingruber, 2003); asimismo, se corrió un análisis espectral de potencia para determinar la presencia de frecuencias significativas (Bunn et al., 2018).

La serie de precipitación reconstruida se correlacionó con los índices El Niño Oscilación del Sur (ENSO) como son: el Índice de Oscilación del Sur (SOI), Índice Multivariado de ENSO (MEI) e Índice de Lluvia Tropical (TRI) (Wolter & Timlin, 2011; Wright, 1979), así como con índices de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Mantua, 2017) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) (Endfield, Mestas-Núñez, & Trimble, 2001).

Con el fin de determinar si los crecimientos anuales de las especies arbóreas involucradas constituyen un *proxy*

Finally, the normalized volumes of runoff recorded in the basins of the Fuerte, Sinaloa and Conchos rivers in Chihuahua, were related to the indices of the southwest Chihuahua growth series by simple correlation analysis with hydrometric data obtained from the Banco Nacional de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2019). For the Fuerte river, data was obtained from station 10037 Huites, whose recording period includes 1942-1992, and for the Conchos river data was used from stations 24195 San Antonio and 36060 Los Angeles with recording periods of 1943-1986 and 1954-2014, respectively. These data were used to determine the degree of association of interannual variation in runoff and growths of the tree species involved.

Results

Dendrochronological Series

Eight ring-width chronologies were generated involving between 40 and 135 increment cores. These showed intercorrelations between series in a range of 0.54 to 0.73 (>0.328 required by COFECHA for suitable dating) and lengths of 108 to 347 years (Table 2). Figure 2 shows that the series had a similar climatic behavior for the common period (1910-2005). Correlations in reference to the chronology of the GUA site were greater than 0.5 ($P < 0.01$), although the lowest correlations corresponded to the MOH sites ($r = 0.238$, $P < 0.01$) and POR ($r = 0.344$, $P < 0.01$), respectively.

According to the Principal Component Analysis shown in Figure 3, the first component accounts for 51.8 % of the common variance, with an eigenvalue of 4.5, while components 2 and 3 contributed 14.5 % and 10.2 % of the variance, respectively, representing 76.5 % of the cumulative total variance. The MOH and

de la intensidad y duración de las sequías históricas documentadas en la región, la serie de crecimiento de anillo total se relacionó con índices de sequía como el Índice Reconstruido de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) (Stahle et al., 2016) e Índice de Precipitación Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010).

Finalmente, los volúmenes normalizados de escurrimiento registrados en las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Conchos en Chihuahua, se relacionaron con los índices de las series de crecimiento del suroeste de Chihuahua mediante análisis de correlación simple con datos hidrométricos obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2019). Para el caso del río Fuerte, los datos se obtuvieron de la estación 10037 Huites, cuyo periodo de registros comprende de 1942-1992, y para el río Conchos se emplearon datos de las estaciones 24195 San Antonio y 36060 Los Ángeles con periodos de registros de 1943-1986 y 1954-2014, respectivamente. Estos datos sirvieron para determinar el grado de asociación de la variación interanual en escurrimientos y los crecimientos de las especies arbóreas involucradas.

Resultados

Serie dendrocronológicas

Se generaron ocho cronologías de anillo total al involucrar entre 40 y 135 núcleos de crecimiento. Estas mostraron intercorrelaciones entre series en un rango de 0.54 a 0.73 (>0.328 requerido por COFECHA para un fechado adecuado) y longitudes de 108 hasta 347 años (Cuadro 2). La Figura 2 muestra que las series tuvieron un comportamiento climático similar para el periodo común (1910-2005). Las correlaciones en referencia

Table 2. Extension of the dendrochronological series distributed in the northwest of the state of Chihuahua
Cuadro 2. Extensión de las series dendrocronológicas distribuidas en el noroeste del estado de Chihuahua.

Site / Sitio	Site key / Clave del sitio	Sampled species / Especie muestreada	Series length (years) / Longitud de la serie (años)	Chronology type / Tipo de cronología
Guachochi	GUA	<i>Pinus lumholtzii</i>	1806-2016 (211)	RW
Narogachi	NAR	<i>P. lumholtzii</i>	1875-2017 (143)	RW
La Cruz	LAC	<i>Pinus arizonica</i>	1907-2016 (110)	RW, EW, LW
Porvenir	POR	<i>P. arizonica</i> + <i>Abies durangensis</i>	1897-2013 (117)	RW, EW, LW
Sinforosa	SIN	<i>Pinus leiophylla</i>	1887-2016 (130)	RW, EW, LW
La Gloria	GLO	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1790-2014 (225)	RW, EW, LW
Situriachi	SIT	<i>P. arizonica</i>	1910-2017 (108)	RW, EW, LW
Cerro Mohinora	MOH	<i>P. menziesii</i>	1659-2005 (347)	RW, EW, LW

RW = total ring width, EW = earlywood width, LW = latewood width.

RW = anillo total, EW = madera temprana, LW = madera tardía.

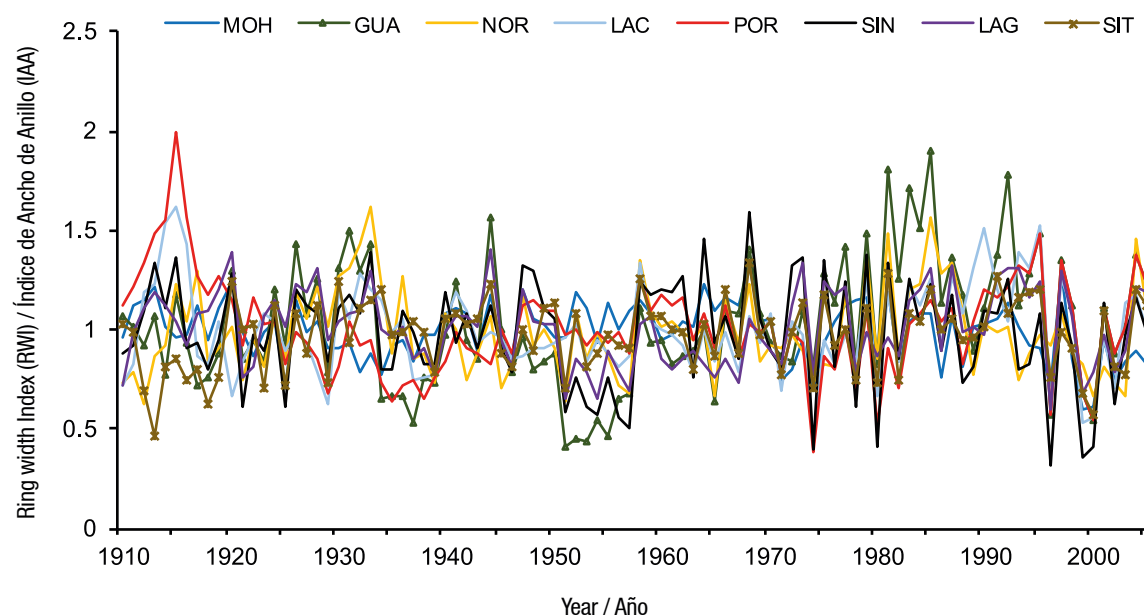


Figure 2. Behavior of the total ring-width series of the common period (1910-2005) at sites in the southwest of the state of Chihuahua. GUA = Guachochi, NAR = Narogachi, LAC = La Cruz, POR = Porvenir, SIN = Sinforosa, GLO = La Gloria, SIT = Situriachi, MOH = Cerro Mohinora.

Figura 2. Comportamiento de las series de anillo total del periodo común (1910-2005) en sitios del suroeste del estado de Chihuahua. GUA = Guachochi, NAR = Narogachi, LAC = La Cruz, POR = Porvenir, SIN = Sinforosa, GLO = La Gloria, SIT = Situriachi, MOH = Cerro Mohinora.

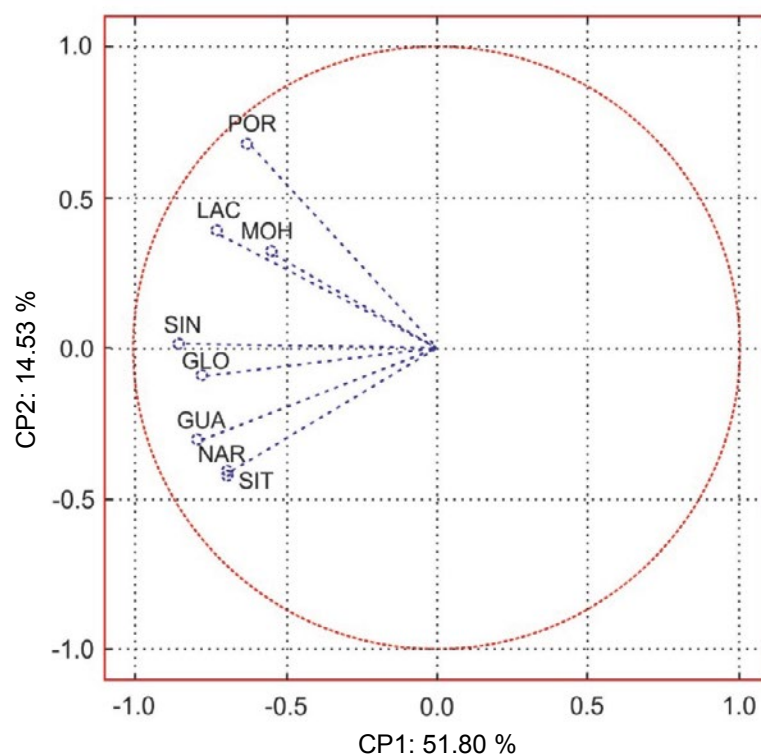


Figure 3. Main components of the chronologies generated in the southwest of the state of Chihuahua. The first component explains 51.8 % of the common variance.

Figura 3. Componentes principales de las cronologías generadas en el suroeste del estado de Chihuahua. El primer componente explica 51.8 % de la varianza común.

POR series showed different behavior to the rest of the chronologies; therefore, in order to integrate the regional chronology, they were excluded from this analysis. The LAC series was not ruled out because it presented high correlation together with the other series, which translates into the same variability.

According to Figure 4, the regional series of total ring-width extends from 1790 to 2017 (228 years), where the number of samples to generate the annual indices was 310 and only 16 of them (5 %) came from cross sections. The sample size increases from 1820 with more than 12 radii, and the Expressed Population Signal (EPS) exceeds 0.85 (Wigley, Briffa, & Jones, 1984). This series shows high interannual and multi-year variation, supported by the intercorrelation parameters between series (0.59), average sensitivity (0.352) and signal-to-noise ratio (27.7).

Response function analysis

The DENDROCLIM program determined that the months of precipitation with positive influence on the annual growth series were from August of the previous year to July of the current year of growth; however, the significant association ($P < 0.05$) happened from August of the previous year to May of the current year of growth, with correlation values of 0.298, 0.357, 0.349, 0.341, 0.497, 0.461, 0.446, 0.408, 0.425 and 0.328, respectively. Based on this information, using simple correlation analysis, it was determined that the period of accumulated precipitation with the greatest influence on annual growth was from September of the previous year to July of the current year of growth. For reconstruction purposes, a calibration was

a la cronología del sitio GUA fueron superiores a 0.5 ($P < 0.01$), aunque las de menor correlación correspondieron a los sitios MOH ($r = 0.238$, $P < 0.01$) y POR ($r = 0.344$, $P < 0.01$), respectivamente.

De acuerdo con el análisis de componentes principales mostrado en la Figura 3, el primer componente explica 51.8 % de la varianza común, con un *eigenvalue* de 4.5, mientras que los componentes 2 y 3 aportaron 14.5 y 10.2 % de la varianza, respectivamente, lo que representa 76.5 % de la varianza total acumulada. Las series MOH y POR mostraron comportamiento distinto al resto de las cronologías; por tal razón, para fines de integrar la cronología regional, se descartaron de dicho análisis. La serie LAC no se descartó debido a que presentó alta correlación en conjunto con las demás series lo que se traduce en una misma variabilidad.

Acorde con la Figura 4, la serie regional de anillo total se extiende de 1790 a 2017 (228 años), donde el número de muestras para generar los índices anuales fue de 310 y solo 16 de ellas (5 %) procedieron de secciones transversales. El tamaño de muestra incrementa a partir de 1820 con más de 12 radios, y la Señal Expresada de la Población (EPS) supera 0.85 (Wigley, Briffa, & Jones, 1984). Esta serie muestra alta variación interanual y multianual, soportado por los parámetros de intercorrelación entre series (0.59), sensibilidad media (0.352) y relación señal/ruido (27.7).

Análisis de función de respuesta

El programa DENDROCLIM determinó que los meses de precipitación con influencia positiva en la serie de

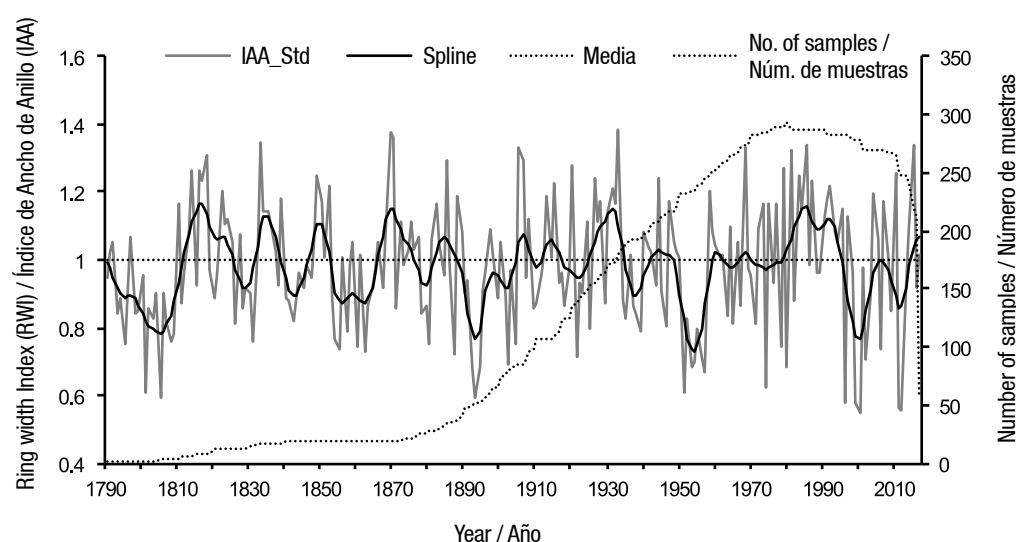


Figure 4. Total ring-width regional chronology for the southwest of the state of Chihuahua. An Expressed population signal (EPS) > 0.85 is obtained from 1820 where the number of radii is greater than 12.

Figura 4. Cronología regional de anillo total para el suroeste del estado de Chihuahua. Una señal expresada de la población (EPS) > 0.85 se obtiene a partir de 1820 donde el número de radios es superior a 12.

performed in the total climate records (1951-2015), as well as in half of them (1951-1982, 1983-2015); the information is shown in Table 3.

The estimated values of precipitation were used in the verification process of the model; that is to say, the subperiod of 1951-1982 was used to calibrate the model and the 1983-2015 to validate it, then the 1983-2015 subperiod was calibrated and the 1951-1982 was verified (Table 4). Because the verification process was significant for all statistical parameters in both subperiods, the total precipitation records were used to generate the following linear reconstruction model:

$$Y_i = 28.862 + 522.04X_i$$

where,

Y_i = reconstructed precipitation of the period from September of the previous year to July of the current year of growth for a specific year

crecimiento anual fueron agosto del año previo a julio del año actual de crecimiento; sin embargo, la asociación significativa ($P < 0.05$) se presentó de agosto del año previo a mayo del año actual de crecimiento, con valores de correlación de 0.298, 0.357, 0.349, 0.341, 0.497, 0.461, 0.446, 0.408, 0.425 y 0.328, respectivamente. Con base en esta información, mediante análisis de correlación simple, se determinó que el periodo de precipitación acumulada con mayor influencia en el crecimiento anual fue de septiembre del año previo a julio del año actual de crecimiento. Con fines de reconstrucción se hizo una calibración en el total de registros climáticos (1951-2015), así como en la mitad de estos (1951-1982, 1983-2015); la información se muestra en el Cuadro 3.

Los valores de precipitación estimados se utilizaron en el proceso de verificación del modelo; es decir, el subperiodo de 1951-1982 se utilizó para calibrar el modelo y el de 1983-2015 para validarlo (Cuadro 4). Posteriormente, el subperiodo 1983-2015 se calibró y el de 1951-1982 se verificó. Debido a que el proceso de

Table 3. Calibration and statistical periods of regression between precipitation records and indices of the standard total ring-width chronology, for the southwest of the state of Chihuahua.

Cuadro 3. Periodos de calibración y estadísticos de la regresión entre los registros de precipitación y los índices de la cronología estándar de anillo total, para el suroeste del estado de Chihuahua.

Period / Periodo	Adjusted R ² / R ² ajustada	Coefficient (mm) / Coeficiente (mm)		Standard Error (mm) / Error estándar (mm)		T-statistic (H ₀ : B = 0) / Estadístico-t (H ₀ : B = 0)		Regression (probability) / Regresión (probabilidad)
		B ₀	B ₁	B ₀	B ₁	B ₀	B ₁	
1951-2015	0.651	28.9	522.0	47.2	47.5	0.61	10.98 ^{**}	0.000
1951-1982	0.780	-103.1	655.9	60.2	62.4	-1.7 [*]	10.5 ^{**}	0.000
1983-2015	0.537	142.8	413.2	68.4	66.9	2.08 ^{**}	6.20 ^{**}	0.000

Adjusted R² according to degrees of freedom. Significance: *P < 0.05; **P < 0.01.

R² ajustada acorde con grados de libertad. Significancias: *P < 0.05; **P < 0.01.

Table 4. Verification statistics for the cumulative seasonal precipitation in September of the previous year to July of the current year of growth, for the southwest of the state of Chihuahua.

Cuadro 4. Estadísticas de verificación para la precipitación estacional acumulada en septiembre del año previo a julio del año actual de crecimiento, para el suroeste del estado de Chihuahua.

Period / Periodo	Pearson Correlation Coefficient / Correlación de Pearson	Reduction of Error ¹ / Reducción del error ¹	t value / Valor de t	Sign test ² / Prueba de signos ²	First negative difference ³ / Primera diferencia negativa ³
1951-1982	0.89	0.69	5.20	4	3
1983-2015	0.74	0.41	4.63	7	8

¹There is no test of significance for this statistic, but any positive results indicate that the reconstruction contributes with unique paleoclimatic information (Fritts, 1976). ²It relates the number of coincidences and disagreements between the observed and reconstructed data and applies an association statistic between the two, known as the "t-test" (Fritts, 1976). ³First difference between observed and reconstructed data (t-t_i); the transformation removes trends that may affect the correlation coefficient (Fritts, 1976). All values were significant (P < 0.05).

¹No existe una prueba de significancia para este estadístico, pero cualquier resultado positivo indica que la reconstrucción contribuye con información única paleoclimática (Fritts, 1976). ²Relaciona el número de coincidencias y desacuerdos entre los datos observados y reconstruidos y aplica un estadístico de asociación entre ambas, conocido como prueba de "t" (Fritts, 1976). ³Primera diferencia entre los datos observados y reconstruidos (t-t_i); la transformación remueve tendencias que pueden afectar el coeficiente de correlación (Fritts, 1976). Todos los valores fueron significativos (P < 0.05).

X_i = annual total ring-width index of the standard regional chronology representative of the southwestern region of Chihuahua.

Figure 5 shows that the reconstruction of precipitation extends from 1790 to 2015 with high interannual and multiannual variation. The dry periods detected in the reconstruction were from 1795 to 1809, 1854 to 1864, 1892 to 1896, 1951 to 1957, 1996 to 2003 and 2011 to 2013, where the drier years (one standard deviation below the mean, estimated in 540.2 mm for the period September-July) are 1801, 1805, 1887, 1893, 1894, 1902, 1921, 1951, 1957, 1974, 1980, 1996, 1999, 2000, 2011 and 2012. The wetter periods occurred from 1812 to 1825, 1832 to 1839, 1848 to 1852, 1866 to 1875, 1928 to 1933 and from 1982 to 1993, with the wettest years (a standard deviation above average) being 1818, 1833, 1869, 1870, 1885, 1905, 1906, 1920, 1933, 1968, 1981, 1985 and 2015.

According to the Power Spectrum Analysis of Figure 6, the reconstructed precipitation series shows significant frequencies in periods close to 2.0 years.

Response of the reconstructed series to indices of general circulation modes and drought indices

Table 5 shows that the association between the regional total ring-width series, circulatory mode indices (ENSO, PDO and AMO) and drought indices (PDSI and SPEI) was significant. The ability to generate maps of reconstructed PDSI at the local, regional or national

verificación fue significativo para todos los parámetros estadísticos en ambos subperiodos, el total de registros de precipitación se utilizó para generar el modelo lineal de reconstrucción siguiente:

$$Y_i = 28.862 + 522.04X_i$$

donde,

Y_i = precipitación reconstruida del periodo septiembre del año previo a julio del año actual de crecimiento para un año específico

X_i = índice anual de anillo total de la cronología regional estándar representativa de la región suroeste de Chihuahua.

La Figura 5 muestra que la reconstrucción de la precipitación se extiende de 1790 a 2015 con alta variación interanual y multianual. Los periodos secos detectados en la reconstrucción fueron de 1795 a 1809, 1854 a 1864, 1892 a 1896, 1951 a 1957, 1996 a 2003 y 2011 a 2013, donde los años más secos (una desviación estándar por debajo de la media, estimada en 540.2 mm del periodo septiembre-julio) se presentaron en 1801, 1805, 1887, 1893, 1894, 1902, 1921, 1951, 1957, 1974, 1980, 1996, 1999, 2000, 2011 y 2012. Los periodos más húmedos ocurrieron de 1812 a 1825, 1832 a 1839, 1848 a 1852, 1866 a 1875, 1928 a 1933 y de 1982 a 1993, con los años más húmedos (una desviación estándar por encima de la media) en 1818, 1833, 1869, 1870, 1885, 1905, 1906, 1920, 1933, 1968, 1981, 1985 y 2015.

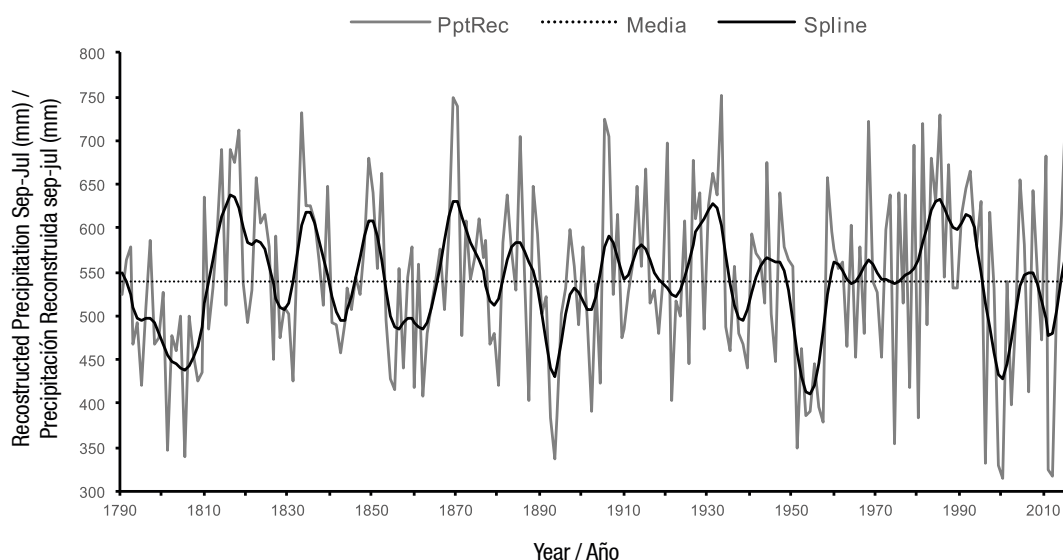


Figure 5. Reconstruction of seasonal precipitation September-July, representative of the southwestern region of the state of Chihuahua.

Figura 5. Reconstrucción de precipitación estacional septiembre-julio, representativa de la región suroeste del estado de Chihuahua.

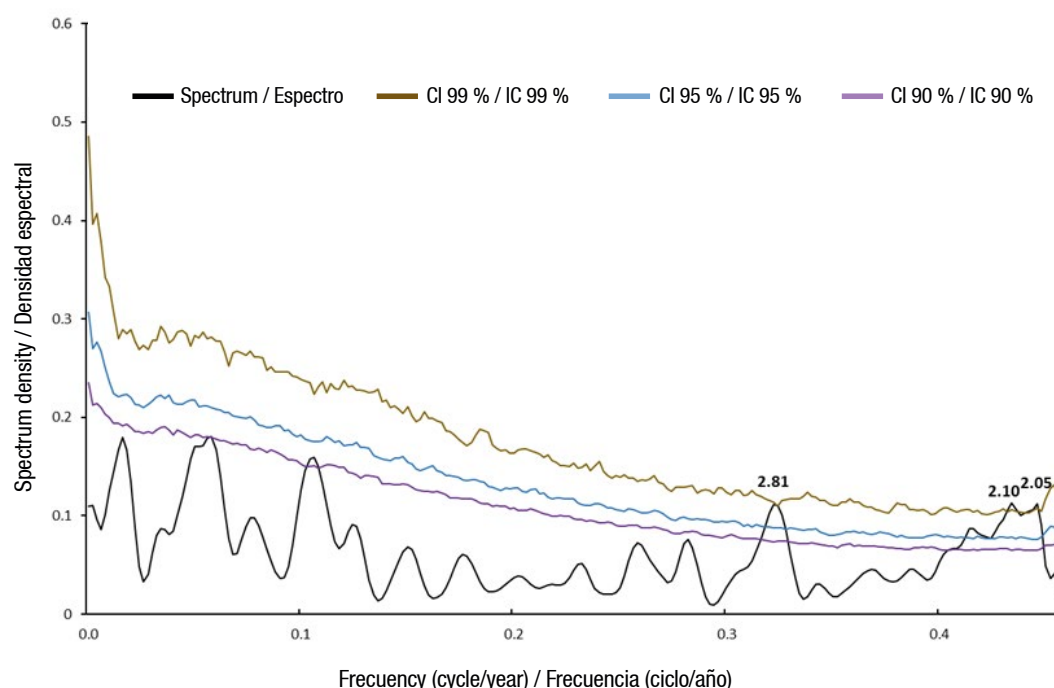


Figure 6. Power Spectrum Analysis of the reconstructed precipitation for the southwestern region of Chihuahua. The CI represents the confidence interval at 99 %, 95 % and 90 %.

Figura 6. Análisis espectral de la precipitación reconstruida para la región suroeste de Chihuahua. El IC representa el intervalo de confianza al 99 %, 95 % y 90 %.

level, for a year or period of years, makes it possible to determine the dominant hydrological condition at an annual or multi-annual level during the extremely dry and wet periods, as occurred for the extraordinary drought from 1951 to 1957 and the wet period from 1928 to 1933 (Figure 5).

Regional series response to water production volumes

The representative regional chronology of the Southwest of Chihuahua showed significant association with the volumes of water draining to the Pacific coastal plain, in the seasonal period September-August ($r = 0.77$, $P = 0.000$, $n = 50$, 1943-1992); in particular, with the volumes recorded in the Fuerte river basin. This association, although significant, was lower for runoff recorded in tributaries of the Conchos river basin, where the association was only 0.46 ($P = 0.001$, $n = 44$, 1943-1986).

Discussion

Coniferous species present in the slopes of the SMO of the Southwest of Chihuahua, among which are *P. lumholtzii*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. menziesii* and *A. durangensis*, have similar growth in dendrochronological terms, since their growth series showed associations greater than 0.5 with respect to the Guachochi

De acuerdo con el análisis espectral de la Figura 6, la serie de precipitación reconstruida muestra frecuencias significativas en periodos cercanos a 2.0 años.

Respuesta de la serie reconstruida a índices de fenómenos de circulación general y de sequía

El Cuadro 5 indica que la asociación entre la serie regional de anillo total y los índices de modos circulatorios (ENSO, PDO y AMO) e índices de sequía (PDSI y SPEI) resultó significativa. La capacidad de generar mapas de PDSI reconstruido a nivel local, regional o nacional, para un año o periodo de años, permite determinar la condición hidrológica dominante a nivel anual o multianual durante los periodos extremadamente secos y húmedos, como ocurrió para la sequía extraordinaria de 1951 a 1957 y el periodo húmedo de 1928 a 1933 (Figura 5).

Respuesta de la serie regional a volúmenes de producción de agua

La cronología regional representativa del suroeste de Chihuahua mostró asociación significativa con los volúmenes de agua que drenan hacia la planicie costera del Pacífico, en el periodo estacional septiembre-agosto ($r = 0.77$, $P = 0.000$, $n = 50$, 1943-1992); en particular, con los volúmenes registrados en la cuenca del río Fuerte. Esta asociación, aunque significativa, fue inferior para

Table 5. Association between indices of general circulation modes and indices of the regional ring-width chronology for the Southwest of Chihuahua.**Cuadro 5. Asociación entre los índices de fenómenos de circulación general e índices de la cronología regional para el suroeste de Chihuahua.**

Index/ Índice	Months/ Meses	Period (years)/ Periodo (años)	Correlation (r) / Correlación (r)	
			RWI/IAA	Probability/Probabilidad
Reconstructed SOI/ SOI reconstruido	November-February/ noviembre-febrero	1791-1977 (187)	-0.58	0.000
SOI	July-April/ julio-abril	1857-2017 (151)	-0.48	0.000
MEI	October-April/ octubre-abril	1951-2017 (67)	0.46	0.000
TRI	July-April = julio-abril	1895-1994 (100)	0.49	0.000
PDO	August-October/ agosto-octubre	1949-2015 (67)	0.47	0.000
AMO	March-June/ marzo-junio	1857-2015 (159)	0.18	0.020
PDSI	June-August/ junio-agosto	1900-2012 (113)	0.68	0.000
SPEI	August-June/ agosto-junio	1951-2017 (67)	0.71	0.000

RWI = ring width index. SOI = Southern Oscillation Index (Stahle et al., 1998); instrumental SOI (Allan et al., 1996); MEI = ENSO multivariate Index (El Niño Southern Oscillation) (Wolter & Timlin, 1993); TRI = Tropical rain Index (Wright, 1979); PDO = Pacific Decadal Oscillation (Mantua, 2017); AMO = Atlantic Multidecadal Oscillation (van Oldenborgh, te Raa, Dijkstra, & Philip, 2009); reconstructed PDSI = Palmer Drought Severity Index (Stahle et al., 2016); SPEI = Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Vicente-Serrano et al., 2010).

IAA = índice de ancho de anillos. SOI = Índice de Oscilación del Sur (Stahle et al., 1998); SOI instrumental (Allan et al., 1996); MEI = índice multivariado de ENSO (El Niño Oscilación del Sur) (Wolter & Timlin, 1993); TRI = Índice de Lluvia Tropical (Wright, 1979); PDO = Oscilación Decadal del Pacífico (Mantua, 2017); AMO = Oscilación Multidecadal del Atlántico (van Oldenborgh, te Raa, Dijkstra, & Philip, 2009); PDSI reconstruido = Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Stahle et al., 2016); SPEI = Índice Estandarizado de Precipitación Evaporación (Vicente-Serrano et al., 2010).

chronology, which was considered as a reference in this study. This similar response between the series implies that the species involved capture the influence of climatic phenomena that impact an entire region. Although interannual radial growths vary by species, they show similar fluctuations in function of a common limiting factor such as precipitation (Fritts, 1976). This common response has made it possible to reconstruct historical droughts with national or international impact (Stahle et al., 2011).

The analysis of principal components in a dendrochronological network, for the selection of the series that most contribute to a common climate variance in hydroclimatic reconstruction, is a methodology used for several decades; its use has been magnified, since an individual chronology can hardly capture all climate variability in a wide region, where ecological and topographic conditions usually generate fluctuations in behavior (Duchesne, D'Orangeville, Ouimet, Joule, & Kneeshaw, 2017). The integration of various chronologies increases the sample size, dilutes the influence of disturbances of natural and anthropogenic origin (St. George, 2014) and allows the prediction of the growth response of forest species to environmental changes in a region (Drobyshev, Gewehr, Berninger, & Bergeron, 2013).

escurrimientos registrados en los tributarios de la cuenca del río Conchos, donde la asociación fue solo de 0.46 ($P = 0.001$, $n = 44$, 1943-1986).

Discusión

Las especies de coníferas presentes en las vertientes de la SMO del suroeste de Chihuahua, entre las que se encuentran *P. lumholtzii*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. menziesii* y *A. durangensis*, poseen crecimiento similar en términos dendrocronológicos, ya que sus series de crecimiento mostraron asociaciones superiores a 0.5 con respecto a la cronología de Guachochi, que en este estudio se consideró como referencia. Esta respuesta similar entre las series implica que las especies involucradas captan la influencia de fenómenos climáticos que impactan toda una región. A pesar de que los crecimientos radiales interanuales varían según la especie, estos muestran fluctuaciones similares en función de un factor limitante común como es la precipitación (Fritts, 1976). Esta respuesta común ha hecho factible la reconstrucción de sequías históricas de impacto nacional o internacional (Stahle et al., 2011).

El análisis de componentes principales en una red dendrocronológica, para la selección de las series que más aportan a una varianza climática común en

In Mexico, the integration of dendrochronological series through principal components has been used for precipitation reconstructions in the Chihuahua-Durango region (Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, & Burns, 2003; Díaz et al., 2002; Villanueva et al., 2015a) and other parts of the country (Stahle et al., 2016; Villanueva et al., 2015b). Thus, the use of dendrochronological networks has allowed the reconstruction of streamflows in basins of northern Mexico (Villanueva et al., 2017; Woodhouse, Stahle, & Villanueva, 2012), particularly those that drain to the Pacific coast, where irrigation districts are located, whose water originates in SMO basins (CONAGUA, 2018).

The hydroclimatic variability in the southwest of Chihuahua, particularly in UMAFOR 0807, had not been documented; however, its behavior is similar to that found in other regions of the state (Villanueva et al., 2015b). The discrepancy in other reconstructions of seasonal precipitation in the state of Chihuahua lies in the location of the study and in the reconstructed period; for example, the seasonal reconstruction performed by Díaz et al. (2003) covers the November-April period and doesn't get to detect some of the most intense droughts that occurred in the southwest of Chihuahua during the summer. A similar situation is observed in the study of the Basaseachi National Park region, where the reconstruction of seasonal precipitation October-April does not agree with most of the driest periods detected in the present study that includes a larger seasonal period (Irby et al., 2013).

The historic impact of drought in the state of Chihuahua, prior to the 20th century, is based heavily on colonial archives (Endfield & Tejedo, 2006); however, this information may not be representative of other regions of the state, where the impact of drought could be different in terms of food production and its impact on the population (Easterling et al., 2001). In this way, it is important to determine the events and periods of drought in regions such as the southwest of Chihuahua that are sources of water provision to agricultural areas of great economic importance; in addition, in this region of forestry excellence, biomass production, translated in timber yield, largely depends on the dominant climatic conditions (CONAFOR, 2009) and could be reduced by the effect of global warming (Bickford et al., 2011; Castruita-Esparza et al., 2019).

The climatic significance of the region is manifested by the influence that atmospheric circulatory modes have and that determine the interannual variability and multiannual climate in the region; for example, the ENSO phenomenon through its indices (SOI, MEI, and TRI) shows significant effects on the annual radial increase of forest species, with a significant association close to 0.5, from July of the previous year to April of the current year of growth and of 0.58 from November

la reconstrucción hidroclimática, es una metodología utilizada desde hace varias décadas; su uso se ha magnificado, ya que una cronología individual difícilmente puede captar toda la variabilidad climática en una región amplia, donde las condiciones ecológicas y topográficas normalmente generan fluctuaciones en el comportamiento (Duchesne, D'Orangeville, Ouimet, Joule, & Kneeshaw, 2017). La integración de diversas cronologías incrementa el tamaño de muestra, diluye la influencia de disturbios de origen natural y antropogénico (St. George, 2014) y permite predecir la respuesta en crecimiento de especies forestales a los cambios ambientales en una región (Drobyshev, Gewehr, Berninger, & Bergeron, 2013).

En México, la integración de series dendrocronológicas a través de componentes principales se ha utilizado para reconstrucciones de precipitación en la región de Chihuahua-Durango (Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, & Burns, 2003; Díaz et al., 2002; Villanueva et al., 2015a) y otras partes del país (Stahle et al., 2016; Villanueva et al., 2015b). De esta manera, el uso de redes dendrocronológicas ha permitido la reconstrucción de caudales en cuencas del norte de México (Villanueva et al., 2017; Woodhouse, Stahle, & Villanueva, 2012), particularmente de aquellas que drenan hacia la costa del Pacífico, donde se ubican distritos de riego, cuya agua se origina en cuencas de la SMO (CONAGUA, 2018).

La variabilidad hidroclimática en el suroeste de Chihuahua, particularmente en la UMAFOR 0807, no había sido documentada; sin embargo, su comportamiento es similar al encontrado en otras regiones del estado (Villanueva et al., 2015b). La discrepancia en otras reconstrucciones de precipitación estacional en el estado de Chihuahua radica en la ubicación del estudio y en el periodo reconstruido; por ejemplo, la reconstrucción estacional realizada por Díaz et al. (2003) cubre el periodo noviembre-abril y no alcanza a detectar algunas de las sequías más intensas ocurridas para el suroeste de Chihuahua durante el verano. Una situación similar se observa en el estudio de la región del Parque Nacional Basaseachi, donde la reconstrucción de precipitación estacional octubre-abril no concuerda con la mayoría de los periodos más secos detectados en el presente estudio que incluye un periodo estacional más amplio (Irby et al., 2013).

El impacto histórico de las sequías en el estado de Chihuahua, previo al siglo XX, se fundamenta en gran medida en archivos coloniales (Endfield & Tejedo, 2006); sin embargo, esta información pudiera no ser representativa de otras regiones del estado, donde el impacto de sequías pudo ser diferente en término de producción de alimentos e impacto en la población (Easterling et al., 2001). De esta manera resulta importante determinar los eventos y periodos de

to February, only surpassed by some of the sites of Durango, where the association reaches a value of 0.63 (Villanueva et al., 2017). The association with this phenomenon, which is presented indirectly in the region, through its teleconnection, is one of the most clear and meaningful in North America, which favors the presence of increased precipitation during the warm phase of this phenomenon, and drought conditions in its cold phase (Mendez & Magaña, 2010; Stahle et al., 1998; Torbenson et al., 2019). The presence of significant frequencies in the reconstruction around two and three years is within the normal frequencies described for ENSO in the range of two to ten years (Li et al., 2011), which may explain the high variability of precipitation.

The association between the PDO Index, in the period from August of the previous year to October of the current year of growth, and the dendrochronological indices showed a significant value of 0.47. ENSO's interaction with PDO is well known in Mexico (Pavia, Graef, & Reyes, 2006) and its influence has been demonstrated in dendroclimatic reconstructions in Baja California (Meko et al., 2013). Recent studies have determined the influence of ENSO on the sea surface temperature in the tropical Pacific, in both interannual and decadal levels (Kumar & Hu, 2014). The latter is better known as PDO (Mantua, 2017), a pattern that results from fluctuations in the low pressure center "Aleutian Low" in the North Pacific, either intrinsically or through ENSO teleconnection (Jia & Ge, 2017). The relationship between the two circulatory phenomena could be determined in detail for this region of the country, involving a greater number of climatic variables.

The relationship between the regional dendrochronological series of total ring-width in the southwest of Chihuahua with drought indices was highly significant with the reconstructed PDSI from the June-August period ($r = 0.68$, $P < 0.01$, 1900-2012), indicating that tree species in this region constitute a historical proxy of the dominant drought conditions. This result is corroborated by the association of the growth series with average indices of the SPEI for the period August of the previous year-June of the current year of growth ($r = 0.71$, $P < 0.01$, 1951-2017). The results are more relevant considering that the growths are significantly correlated with the streamflow in the Fuerte river basin which are used for irrigation purposes, as well as with the streamflow that feed tributaries of the Conchos river and that constitute the source of water for various irrigation districts.

Conclusions

The southwest of the state of Chihuahua is a climatically homogeneous region and the development of a dendrochronological network, composed by various

sequía en regiones como el suroeste de Chihuahua que constituyen fuentes de provisión hídrica para zonas agrícolas de gran importancia económica; además, en esta región de excelencia forestal, la producción de biomasa, traducida en madera en rollo, depende en gran medida de las condiciones climáticas dominantes (CONAFOR, 2009) y pudiera reducirse por efecto del calentamiento global (Bickford et al., 2011; Castruita-Esparza et al., 2019).

La importancia climática de la región se manifiesta por la influencia que los fenómenos atmosféricos de circulación general ejercen y que determinan la variabilidad interanual y multianual del clima en la región; por ejemplo, el fenómeno ENSO a través de sus índices (SOI, MEI y TRI) muestra efectos significativos en el incremento anual arbóreo, con una asociación significativa cercana a 0.5, desde julio del año previo hasta abril del año actual de crecimiento y de 0.58 de noviembre a febrero, solo superado por algunos sitios de Durango donde la asociación llega alcanzar un valor de 0.63 (Villanueva et al., 2017). La asociación con este fenómeno que se presenta de manera indirecta en la región, a través de su teleconexión, es una de las más claras y significativas en Norteamérica, lo que favorece la presencia de mayor precipitación durante la fase cálida de este fenómeno y condiciones de sequía en su fase fría (Méndez & Magaña, 2010; Stahle et al., 1998; Torbenson et al., 2019). La presencia de frecuencias significativas en la reconstrucción alrededor de dos y tres años se ubica dentro de las frecuencias normales descritas para ENSO en el rango de dos a 10 años (Li et al., 2011), lo que quizá explique la elevada variabilidad de precipitación.

La asociación entre el índice PDO, periodo agosto del año previo a octubre del año actual de crecimiento, y los índices dendrocronológicos mostró un valor significativo de 0.47. La interacción de ENSO con el PDO es bien conocida en México (Pavia, Graef, & Reyes, 2006) y su influencia se ha demostrado en reconstrucciones dendroclimáticas en Baja California (Meko et al., 2013). Estudios recientes han determinado la influencia de ENSO en la temperatura superficial del agua del mar en el Pacífico tropical, tanto a nivel interanual como decadal (Kumar & Hu, 2014). Este último es mejor conocido como PDO (Mantua, 2017), patrón que resulta de fluctuaciones del centro de baja presión "bajo Aleutian" en el Pacífico norte, ya sea de manera intrínseca o mediante la teleconexión de ENSO (Jia & Ge, 2017). La relación entre ambos fenómenos circulatorios pudiera determinarse con mayor detalle para esta región del país, al involucrar un mayor número de variables climáticas.

La relación entre la serie dendrocronológica regional de anillo total en el suroeste de Chihuahua con índices de sequía resultó altamente significativa con el PDSI

tree species and integrated into a regional chronology, allowed to capture the interannual and multiannual variability of the climate. The dendrochronological series had significant influence from ENSO (El Niño Southern Oscillation) in the period from July of the previous year to April of the current year of growth. The PDO (Pacific Decadal Oscillation) index had a significant influence on precipitation from August of the previous year to October of the current year of growth. The relationship between the regional ring-width series and drought indices (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [SPEI] and Palmer Drought Severity Index [PDSI]) was significant. This relationship indicates the potential of the growth rings to define drought conditions of the last centuries in the region and, therefore, of the production of water resources in irrigation districts of basins that drain into the Pacific coast and the plateau of the Chihuahua desert.

Acknowledgements

This study was supported with resources from the SEP-CONACYT sector fund project No. 283134 “Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas”

End of English version

References / Referencias

- Allan, R., Lindsay, J., & Parker, D. (1996). *El Niño Southern Oscillation and climate variability*. Australia: CSIRO. Retrieved from <https://trove.nla.gov.au/work/14018011?selectedversion=NBD12345457>
- Bickford, I. N., Fulé, P. Z., & Kolb, T. E. (2011). Growth sensitivity of drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevational gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist*, 71(3), 338–348. doi: 10.3398/064.071.0302
- Biondi, F., & Weikul, K. (2004). DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring. *Computer and Geosciences*, 30(3), 303–311. doi: 10.1016/j.cageo.2003.11.004
- Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., M’erian, P., Qeadan, F., Zang, C., ... Wernick, J. (2018). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package (version 1.6.7). Retrieved from <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/>
- Castruita-Esparza, L. U., Silva, C. R. L., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Correa-Díaz, A., & Horwath, W. (2019). Coping with extreme events: growth and water-use efficiency of trees in western Mexico during the driest and wettest periods of the past one hundred sixty years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(11), 1–13. doi: 10.1029/2019JG005294
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369–388. doi: 10.1023/A:1024835630188
- reconstruido del periodo junio-agosto ($r = 0.68$, $P < 0.01$, 1900-2012), lo cual indica, que las especies arbóreas en esta región constituyen un *proxy* histórico de las condiciones dominantes de sequía. Este resultado se corrobora con la asociación de la serie de crecimiento con índices promedio del SPEI del periodo agosto del año previo-junio del año actual de crecimiento ($r = 0.71$, $P < 0.01$, 1951-2017). Los resultados toman mayor relevancia al considerar que los crecimientos se encuentran significativamente correlacionados con los volúmenes de flujo en la cuenca del río Fuerte y que son utilizados con fines de irrigación, así como con los flujos que alimentan tributarios del río Conchos y que constituyen la fuente de agua para diversos distritos de riego.
- ## Conclusiones
- El suroeste del estado de Chihuahua es una región climáticamente homogénea y el desarrollo de una red dendrocronológica, compuesta por diversas especies arbóreas e integrada en una cronología regional, permitió captar la variabilidad interanual y multianual del clima. Las series dendrocronológicas tuvieron influencia significativa de ENSO (El Niño Oscilación del Sur) en el periodo julio del año previo hasta abril del año actual de crecimiento. El índice PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) tuvo influencia significativa sobre la precipitación desde agosto del año previo hasta octubre del año actual de crecimiento. La relación entre la serie de crecimiento regional e índices de sequía (Índice Estandarizado de Precipitación Evaporación [SPEI] e Índice de Severidad de Sequía de Palmer [PDSI]) fue significativa. Dicha relación indica el potencial de los anillos de crecimiento para definir condiciones de sequía de los últimos siglos en la región y, por ende, de la producción de recursos hídricos en distritos de riego de cuencas que drenan a la costa del Pacífico y a la altiplanicie del desierto Chihuahuense.
- ## Agradecimientos
- El presente estudio fue apoyado con recursos del fondo sectorial SEP-CONACYT proyecto núm. 283134 “Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas”.
- ## Fin de la versión en español
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Estadísticas del agua en México*. México: SEMARNAT. Retrieved from http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Banco nacional de aguas superficiales*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2009). *Estudio regional forestal: Región de manejo silvícola de Guachochi*,

- A. C. Sistema biométrico. UMAFOR 0807, Guachochi, Chihuahua. Retrieved from cnf.gob.mx:8443/snif/seif_chihuahua/programas/programasestrategicos/manejo-forestal-sustentable/sistemas-biometricos
- 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>
- Descroix, J., Nouvelot, J. F., & Vauclin, M. (2002). Evaluation of antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of Hydrology*, 263(1-4), 114–130. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00047-1
- 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. doi: 10.3354/cr022237
- Drobyshev, I., Gewehr, S., Berninger, F., & Bergeron, Y. (2013). Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *Journal of Ecology*, 101(1), 231–242. doi: 10.1111/1365-2745.12007
- Duchesne, L., D'Orangeville, L., Ouimet, R., Houle, D., & Kneeshaw, D. (2017). Extracting coherent tree-ring climatic signals across spatial scales from extensive forest inventory data. *PLoS ONE*, 12(12), e0189444. doi: 10.1371/journal.pone.0189444
- Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2001). Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin American Meteorology Society*, 81(3), 417–425. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2
- Endfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., & Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077–2080. doi: 10.1029/2000GL012745
- Endfield, G., & Tejedo, I. F. (2006). Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change*, 75, 391–419. doi: 10.1007/s10584-006-3492-7
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2013). ERIC III versión 3.2. Extractor rápido de información climatológica. CONAGUA. Retrieved from http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/
- Esper, J., Cook, E. R., Krusk, P., Peters, K., & Schweingruber, F. (2003). Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research*, 59(2), 81–98. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/handle/10150/262573>
- Feng, S., & Fu, Q. (2013). Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmospheric, Chemistry and Physics*, 13, 10081e10094. doi: 10.5194/acp-13-10081-2013
- Fritts, H. C. (1976). *Tree-rings and climate*. New York, USA: Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.^a ed.). México: Instituto de Geografía de la UNAM. Retrieved from http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/handle/10150/261223>
- Holmes, R. L. (2001). Dendrochronology program library. Retrieved June 10, 2019 from <https://www.ltrr.arizona.edu/software.html>
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva, D. J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93–105. doi: 10.21829/myb.2013.191349
- Jia, X., & Ge, J. (2017). Modulation of the PDO to the relationship between moderate ENSO events and the winter climate over North America. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4275–4287. doi: 10.1002/joc.5083
- Kumar, A., & Hu, Z. (2014). How variable is the uncertainty in ENSO sea surface temperature prediction? *Journal of Climate*, 27, 2779–2788. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00576.1
- Li, J., Shang-Ping, X., Cook, E. R., Huang, G., D'Arrigo, R., Jian, L., & Zheng, X. (2011). Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nature Climate Change*, 1, 114–118. doi: 10.1038/nclimate1086
- Mantua, N. J. (2017). The Pacific Decadal Oscillation (PDO). Retrieved June 10, 2019 from <http://jisao.washington.edu/pdo/>
- Meko, D. M., Touchan, R., Villanueva, J., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Castro, C. L., & Leavitt, S. W. (2013). Sierra San Pedro Martir, Baja California cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1660–1673. doi: 10.1002/2013JG002408
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *American Meteorological Society*, 23, 1175–1188. doi: 10.1175/2009JCLI3080.1
- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, F. (2006). PDO-ENSO effects in the climate of Mexico. *American Meteorological Society*, 19, 6433–6438. doi: 10.1175/JCLI4045.1
- St. George, S. (2014). The global network of tree-ring widths and its applications to paleoclimatology. *Past Global Changes Magazine*, 22(1), 16–17. doi: 10.22498/pages.22.1.16
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., ...Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70(10), 2137–2152. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Burnette, D. J., Cerano-Paredes, J., Heim Jr., R. R., Fye, F. K., Acuña-Soto, R., ...Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38, L05703. doi: 10.1029/2010GL046472
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., ...Howard, J. M. (2016). The

- Mexican drought atlas: tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Review*, 149, 34–60. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. USA: The University of Chicago.
- Terán, A. (2010). *Análisis de escenarios de lluvia en México*. Tesis doctoral, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Retrieved from <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/23294>
- Torbenson, C. A., Stahle, D. W., Howard, J. M., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Cook, E. R., & Griffin, D. (2019). Multidecadal modulation of the ENSO teleconnection to precipitation and tree growth over subtropical North America. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(5), 886–900. doi: 10.1029/2018PA003510
- van Oldenborgh, G. J., te Raa, L. A., Dijkstra, H. A., & Philip, S. Y. (2009). Frequency- or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5(3), 293–301. doi: 10.5194/os-5-293-2009
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. doi: 10.1175/2009jcli2909.1
- Villanueva, J., Cerano, J., Fulé, P. Z., Cortés, C., Vázquez, L., Yocom, L., & Ruiz-Corral, J. A. (2015a). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas*, 87, 141–153. doi: 10.14350/rig.44485
- Villanueva, J., Cerano, J., Vázquez, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., Franco, O., & Ruiz, J. A. (2015b). Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5–14. doi: 10.14350/rig.42003
- Villanueva, J., Gómez, A., Cerano, J., Rosales, S., Estrada, J., Castruita, L. U., & Martínez, A. R. (2017). La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 55–74. doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-04
- Wigley, K. J., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *American Meteorological Society*, 23, 201–213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074–1087. doi: 10.1002/joc.2336
- Woodhouse, C., & Lukas, J. (2006). Drought, tree rings and water resource management in Colorado. *Canadian Water Resources Journal*, 31(4), 297–310. doi: 10.4296/cwrj3104297
- Woodhouse, C. A., Stahle, D. W., & Villanueva, J. (2012). Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over past 500 years. *Climate Research*, 51(2), 125–136. doi: 10.3354/cr01059
- Wright, P. B. (1979). Persistence of rainfall anomalies in the central pacific. *Nature*, 277, 371–374. doi: 10.1038/277371a0