



Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro

Reconstruction of seasonal precipitation with growth-rings in the hydrological region Presidio San Pedro

Beatriz Díaz-Ramírez¹, José Villanueva-Díaz^{2*} y Julián Cerano-Paredes²

¹ Instituto tecnológico del Salto. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. ² Inifap Cenid Raspa. Gómez Palacio, Durango, México * Autor de correspondencia: villanueva.jose@inifap.gob.mx
beatrizdiaz_2@hotmail.com

RESUMEN

La cuenca alta de la región hidrológica Presidio San Pedro genera el agua de uno de los afluentes de Marismas Nacionales en el área limítrofe entre los estados de Sinaloa y Nayarit. En esta cuenca *Pinus durangensis* es una conífera dominante, pero debido a su explotación intensiva quedan pocos rodales remanentes sin disturbio. Para analizar el potencial dendrocronológico de la especie, se colectaron núcleos de crecimiento de 63 árboles, que se procesaron con técnicas dendrocronológicas convencionales. La inter-correlación entre series (0.463), sensibilidad media (0.309), autocorrelación de primer orden (0.41) y relación señal-ruido (5.24), entre otros parámetros estadísticos indicaron excelente potencial de la especie para estudios dendrocronológicos. Se generaron series de tiempo de madera temprana, tardía y de anillo total que se extendió de 1780 a 2012 (232 años). Los índices de madera temprana, respondieron a la precipitación acumulada promedio del período enero-agosto, procedente de cuatro estaciones climáticas circunvecinas al sitio, por lo que se generó un modelo lineal, para una reconstrucción de lluvia invierno a inicios de verano. La variabilidad hidroclimática detectada fue similar a otras desarrolladas previamente para la región hidrológica Presidio San Pedro, donde El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es el fenómeno circulatorio que determina la variación interanual y multianual en la precipitación invernal. No se encontró una relación significativa entre la precipitación de verano y los índices de madera tardía, lo que supone poca variación interanual del Monzón de Norteamérica, no obstante ser causante de 70% de la precipitación anual en esta región hidrológica.

PALABRAS CLAVE: dendrocronología, Durango, El Niño, ENSO, La Niña, México, reconstrucción climática, *Pinus durangensis*.

ABSTRACT

The Presidio San Pedro basin yields the water of one of the main streams draining to Marismas Nacionales in the states of Sinaloa and Nayarit. A dominant conifer species on this watershed is *Pinus durangensis* a heavily logged species such that old-growth forest has disappeared. Increment cores from 63 trees of *P. durangensis* in a low disturbed site were extracted to analyze its dendrochronological potential. The samples were processed by standard dendrochronological techniques. Series intercorrelation (0.463), mean sensitivity (0.309), first order autocorrelation (0.41), and signal to-noise ratio (5.24) among other parameters indicated excellent potential of the species for dendrochronological purposes. Time series of earlywood, latewood and total ring width were developed with a length of 232 years (1780-2012). The earlywood chronology responded to the accumulated January-August precipitation from four weather stations in the watershed and a linear regression model was used to reconstruct seasonal winter to early summer precipitation. Similar to other previous climatic reconstructions for the Presidio San Pedro basin, ENSO was the most influential phenomena on explaining the interannual and multiannual variability. It was not found a significant relationship between latewood indices and summer precipitation indicating low inter-annual variability of the North American Monsoon System, even though this phenomenon causes over 70% of the annual precipitation on this region.

KEYWORDS: dendrochronology, Durango, El Niño, ENSO, La Niña, Mexico, climate reconstruction, *Pinus durangensis*.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento de la variabilidad del clima resulta de gran relevancia en este tiempo, en el que todo indica que las acciones del ser humano han modificado en cierto grado la variación climática natural. El incremento en la concentración de bióxido de carbono y otros gases efecto invernadero, e incremento en la temperatura mínima provocada por acciones de la deforestación, quemas de combustibles fósiles y de otros cambios en el uso del suelo, ha favorecido una mayor frecuencia de eventos hidroclimáticos extremos, incendios, presencia de plagas, enfermedades, entre otros efectos negativos en el ecosistema (IPCC, 2014). Discernir entre si los cambios actuales son causa de la variación climática natural o es efecto de calentamiento global, demanda de información climática histórica, muchas veces inexistente por carecer de registros climáticos instrumentales o bien cuando existen, pueden ser poco confiables o estar incompletos, situación que hace su uso muy limitado. Esta situación tiene cierta justificación, si se considera la extensión territorial de México cercana a los dos millones de kilómetros cuadrados, su orografía, el costo que implica el mantenimiento del equipo y la toma y procesamiento de datos. La modernización continua de equipo en término de automatización y el uso de tecnología satelital ha permitido mejorar la información climatológica en la última década, situación deseable para un mejor monitoreo de la variabilidad climática (Comisión Nacional del Agua, 2012).

Ante esta situación, el uso de datos climáticos indirectos, procedentes de fuentes “*proxy*”, constituyen una fuente de información histórica del clima (Bradley, 1999). Estudios dendrocronológicos resultan de gran relevancia para realizar reconstrucciones paleoclimáticas, ya que son de alta resolución y permiten analizar las fluctuaciones interanuales y multianuales del clima pasado (Fritts, 1976). En el norte de México, desde hace más de una década se viene desarrollando una red dendrocronológica, la cual se ha fundamentado en diversas especies de coníferas con dominancia de *Pseudotsuga menziesii* y de *Taxodium mucronatum* (Villanueva *et al.*, 2011). Esta red, si bien está integrada por más de 150 cronologías, requiere

la inclusión de nuevas especies, que permitan captar con mayor nitidez, el impacto de fenómenos climáticos, que determinan la variabilidad interanual y multianual del clima en esta región.

El *Pinus durangensis* es una de las coníferas de mayor distribución en la Sierra Madre Occidental, en particular en su extremo sur, que comprende los estados de Durango, Chihuahua, Zacatecas y norte de Jalisco (Farjon *et al.*, 1997). La amplia distribución de esta especie en el estado de Durango, aunada a la formación de un fuste recto, color y suavidad de su madera, la hacen una de las más explotadas (García y González, 2003), de tal suerte, que son pocos los sitios de bosques coníferas en la Sierra Madre Occidental, en los que aún se pueden ubicar ejemplares longevos, que puedan extender la información paleoclimática en el tiempo (Lammertink *et al.*, 1997).

La cuenca alta forestada de la cuenca Baluarte genera el agua que fluye por el cauce principal del río Baluarte y que desemboca en el área de Marismas Nacionales, un sitio de prioridad internacional para la conservación (De la Lanza *et al.*, 2012). La presencia de rodales puros o mezclados de *Pinus durangensis*, convierte a esta especie en un candidato idóneo para realizar estudios dendroclimáticos. Así mismo, esta característica permite analizar su potencial en estudios de esta naturaleza. Las características mencionadas anteriormente sobre la especie y los sitios propuestos determinan la posibilidad de proyectar los siguientes objetivos.

OBJETIVOS

a) Determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus durangensis*, una especie de alta importancia maderera en los estados de Durango y Chihuahua; b) con base en las series de crecimiento de anillo total, madera temprana y tardía, determinar la variabilidad climática de los últimos tres siglos, de cuencas que integran la región hidrológica Presidio San Pedro, que drenan hacia ecosistemas importantes de conservación en el Pacífico Mexicano y c) analizar las fluctuaciones hidroclimáticas en el tiempo y determinar el impacto de ENSO en la variabilidad interanual y multianual de la precipitación en la región hidrológica Presidio San Pedro.



MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el paraje Las Minitas, Pueblo Nuevo, Durango (Fig. 1). En este lugar, se ubicó un rodal de bosque mixto con dominancia de *Pinus durangensis*, en las coordenadas geográficas 23° 37' 3.5" latitud Norte y 105° 25' 38.3" longitud Oeste y a 2575 m de altitud.

El área de estudio se ubica en la región hidrológica 11 Presidio San Pedro, dentro de la cuenca Baluarte, que drena hacia el río Baluarte y que desemboca finalmente en la porción sur del estado de Sinaloa, coordenadas 22° 49' 46.5" N, 106° 02' 5.0" O, en sus límites con el estado de Nayarit.

La geología del área está dominada por roca ígnea extrusiva tipo ácida y, morfológicamente, los suelos

dominantes son del tipo Regosol eútrico, con suelos secundarios Cambisol eútrico y Feózem háplico, de textura media (Re+Be+Hh/2L). El clima es semicálido subhúmedo (A)C(w₂), que se caracteriza por poseer una temperatura media anual mayor a 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor a 22 °C; precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor a 55 y porcentaje de lluvia invernal de 5.0% a 10.2% del total anual (Inegi, 2009). El sitio de muestreo se ubica en una ladera con un grado de pendiente de 20° a 30°. La vegetación del sitio no ha sido aprovechada en el pasado y está dominada por un bosque de coníferas de *Pinus durangensis*, asociado a *Pinus cooperi* y *Pinus arizonica*, así como *Quercus sideroxyla*, *Q. rugosa* y *Arbutus arizonica* (García y González, 2003).

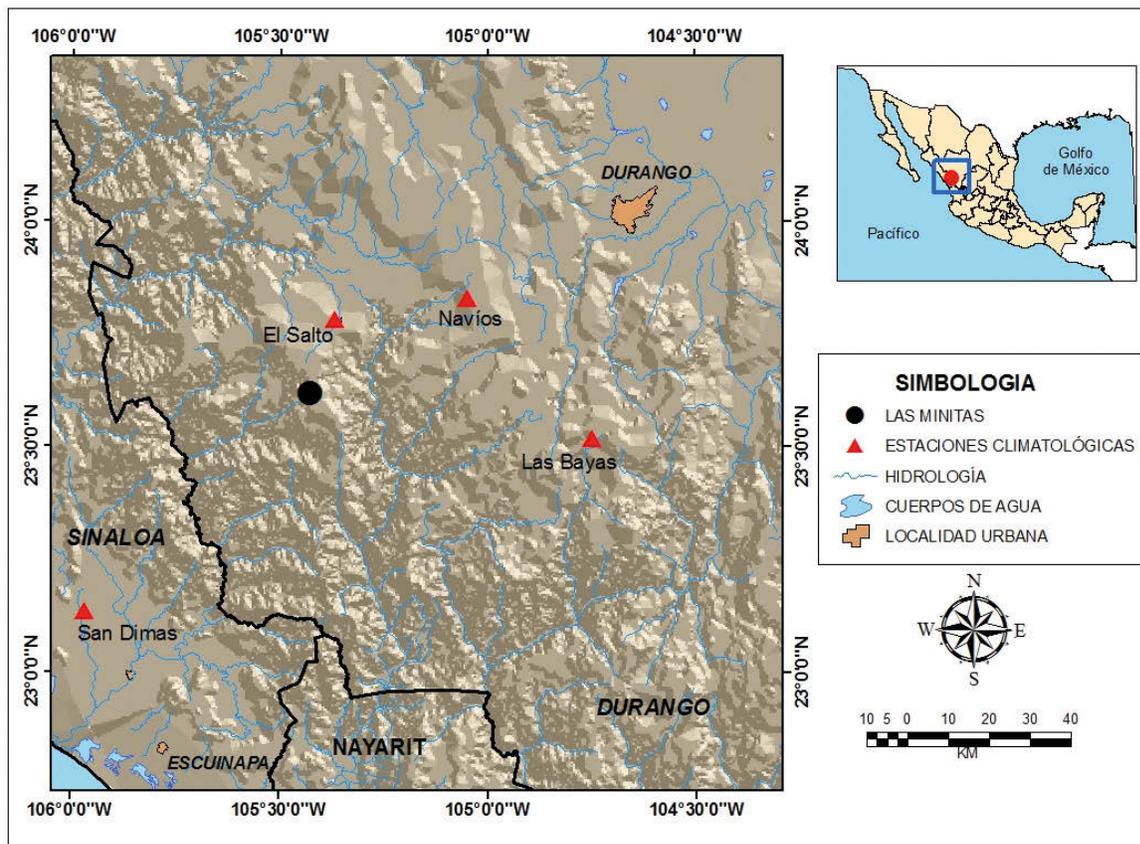


FIGURA 1. Ubicación geográfica del área de estudio, indicada por un círculo y las estaciones climáticas (triángulos) de las que se obtuvieron los datos meteorológicos para el análisis dendroclimático.

Muestreo y especie en estudio

Pinus durangensis es una especie presente en bosque mixto de pino o de pino-encino en el noreste de la Sierra Madre Occidental. La especie se caracteriza por poseer agujas en fascículos de 4 a 8, aunque dominan de 6 (Farjon *et al.*, 1997). Presenta alturas entre 15 m y 40 m con diámetros de fuste a la altura del pecho de 0.5 m a 1.5 m; la copa es redonda en árboles maduros y su madera es suave, de coloración amarilla y de excelente calidad (García y González, 2003); alcanza una producción de madera en rollo hasta de 8 m³ en sitios de Chihuahua y Durango (Armendariz *et al.*, 2003).

Se seleccionaron árboles con el menor disturbio posible en la estructura del rodal y se tomaron muestras (virutas, núcleos de crecimiento) con taladros de incremento de los árboles seleccionados. Se colectó un total de 63 árboles de *Pinus durangensis*. Las muestras fueron registradas y procesadas en Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) en Gómez Palacio, Durango. Para el proceso de montaje, se utilizaron soportes de madera. Posteriormente, se pulieron con lijas en una secuencia de granos ascendentes de grueso a fino (120-400) hasta lograr una visualización de los elementos leñosos más relevantes. Una vez definido el límite entre anillos, se procedió al fechado y cofechado siguiendo las técnicas de Stokes y Smiley (1968).

La observación de los anillos de crecimiento se realizó a través de un estereoscopio con resolución 10X, modelo SZ2-ILSI, marca Olympus Corporation. La medición de las bandas de crecimiento, se realizó con un sistema de medición VELMEX conectado a un PC y con una precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). El control de calidad del fechado, se verificó mediante el programa que compara la correlación entre un conjunto de series en segmentos de 50 años, con traslapes entre secciones de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Este procedimiento permitió asegurar el fechado de cada crecimiento al año exacto de su formación. Los factores no relacionados con clima, se removieron al insertar a las series de medición diversas funciones de ajuste como

exponencial negativa, rectas de regresión y curvas suavizadas. Este ajuste generó series estandarizadas de índice de crecimiento (anillo total, madera temprana y tardía) con una media próxima al valor de 1.0 (Fritts, 1976; Cook, 1987).

El potencial dendrocronológico de la especie, se analizó en función de diversos parámetros derivados de los programas COFECHA y ARSTAN como son intercorrelación entre series, que mide la intensidad de la señal común entre los árboles muestreados en un sitio; sensibilidad media, que es una medida del cambio relativo en grosor de los anillos en relación con el año previo en una serie de crecimiento; autocorrelación de primer orden, que determina la influencia del crecimiento del año previo en el grosor del anillo del año actual. Otras variables consideradas fueron el número de anillos perdidos y problemas con anillos falsos o dobles (Grissino-Mayer, 2001).

Para determinar la influencia del clima sobre el crecimiento del *Pinus durangensis*, se ubicaron las estaciones meteorológicas más próximas al sitio de muestreo. En este caso, específicamente se utilizó ERICIII (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2006). La relación entre las cronologías y la variabilidad de la precipitación, se obtuvo mediante análisis de correlación con datos de las estaciones meteorológicas El Salto, Las Bayas, Navios y San Dimas (Tabla 1). Esta comparación se realizó empleando la sumatoria de la precipitación mensual del año corriente y previo a la formación de los anillos; de esta manera, se definió el período de mayor correlación, al cual se le atribuye como período de crecimiento previo corriente de crecimiento.

La relación entre las versiones de las cronologías con datos de precipitación, se obtuvo mediante análisis de correlación con datos acumulados de precipitación mensual previo a la formación del anillo anual y durante el año de crecimiento. De esta manera, se definió el período, en el cual estadísticamente se encontró la mayor correlación.

Para el proceso de reconstrucción, los registros de precipitación se analizaron mediante el proceso de calibración-verificación utilizando la subrutina Verify incluida en la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL). En este proceso, la



TABLA 1. Estaciones consideradas para la reconstrucción de la precipitación estacional en el periodo enero-agosto (1968-2001).

<i>Estación Meteorológica</i>	<i>Latitud (Grados)</i>	<i>Longitud (Grados)</i>	<i>Altitud (m)</i>	<i>Período de registro (años)</i>
El Salto	23.78	-105.37	2560	1968-2001
Las Bayas	23.55	-105.40	2600	1968-2001
Navios	23.83	-105.05	2492	1958-2001
San Dimas	23.13	-105.97	2350	1968-2001

mitad de los registros disponibles se utilizó para calibración, mientras que la mitad restante para verificación, si ambos sub-períodos eran significativos en término de pasar diversas pruebas estadísticas como prueba de “t”, reducción del error, prueba de signos, primera diferencia mínima y correlación, entonces se utilizó el período total de datos disponibles para generar la ecuación de regresión utilizada para la reconstrucción de los datos de precipitación estacional (Fritts, 1991).

Los datos reconstruidos se verificaron con reconstrucciones dendroclimáticas ya existentes y con archivos históricos disponibles, que registraron efectos económicos y sociales producidos por la incidencia de períodos secos en esta zona. Para analizar el impacto de la variabilidad climática detectada en la reconstrucción, los índices de madera temprana de la versión residual, se compararon con datos registrados y reconstruidos del Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), ya que este fenómeno tiene un alto impacto en la variabilidad de la precipitación invernal en el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Magaña, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De una población de 63 árboles muestreados y 103 núcleos de crecimiento disponibles, se fecharon 88 radios (85% de la muestra total). El restante 15% fue descartado por presentar problemas de crecimiento. Algunos parámetros dendrocronológicos derivados de los programas COFECHA y ARSTAN indicaron que los árboles de esta especie tiene alto potencial dendrocronológico, como lo indica la inter-

correlación entre series de 0.463, sensibilidad media de 0.309, autocorrelación de primer orden (0.41) y relación señal-ruido de 5.24 (Fritts, 1976; Grissino-Mayer, 2001). Los valores de estos parámetros, no son menores a los generados para diversas especies de coníferas presentes en la Sierra Madre Occidental y en consecuencia no limitan la reconstrucción potencial de variables climáticas (Grissino-Mayer, 2001; Villanueva *et al.*, 2008; Constante *et al.*, 2010)

La serie dendrocronológica de anillo total se extendió de 1780 a 2012 (233 años de longitud) y, acorde con el número de muestras que intervinieron en el cálculo del valor del índice de cada año, el período más apropiado con fines de reconstrucción paleoclimática se extiende de 1840 a 2013, donde se presentan más de 5 radios y que se incrementa a más de 70 en los últimos 50 años de la cronología (Fig. 2). Este período fue determinado por el parámetro SSS (Subsample Signal Strength, por sus siglas en inglés), que compara una cronología con un tamaño de muestra infinita, en relación con el comportamiento de la misma cronología con una muestra finita (Cook, 1987).

La desviación estándar del período de 1785 a 1840 (0.0186) y de 1841 a 2013 (0.019) indicó similitud en su variación interanual; adicionalmente, la presencia de series dendrocronológicas y estudios dendroclimáticos desarrollados previamente en cuencas vecinas de los estados de Chihuahua y Durango, permitió que se utilizara el período total de la cronología desarrollada con fines de reconstrucción, ya que de esta manera, se pudo verificar la variabilidad hidroclimática del período soportado con un tamaño de muestra menor.

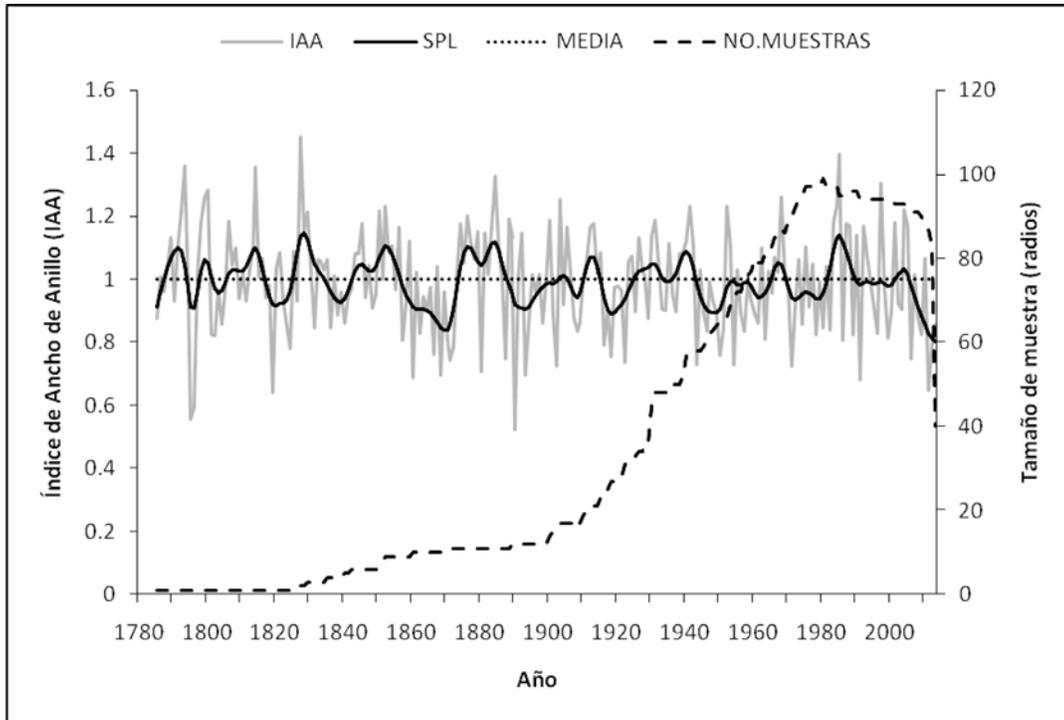


FIGURA 2. Serie dendrocronológica estándar de anillo total y tamaño de muestra empleado para generar la cronología con extensión de 1785-2012 (232 años).

Función de Respuesta

Los análisis de correlación entre la cronología y los datos climáticos de la región durante el intervalo de 1968 a 2001, indicaron que solo cuatro de las estaciones meteorológicas (El Salto, Las Bayas, Navíos y San Dimas) tuvieron una asociación positiva. Específicamente, la serie residual de madera temprana presentó una correlación significativa con los meses de enero a agosto del año corriente de crecimiento (Tabla 1).

Para definir la respuesta del crecimiento a las condiciones climáticas, se correlacionó la serie residual de madera temprana (EWI) con los registros de precipitación total del período 1968-2001; no obstante, la mejor correlación se obtuvo para el período 1968-1998 entre el EWI y la precipitación acumulada enero-agosto ($r = 0.72$, $p < 0.01$). Diferentes períodos estacionales de precipitación mostraron correlaciones positivas con el crecimiento de madera temprana; es decir, enero-abril ($r = 0.657$, $p < 0.01$), enero-mayo ($r = 0.654$, $p < 0.01$) y enero-agosto ($r = 0.72$,

$p < 0.01$); este último y por tener mayor correlación e incluir un mayor número de meses, se utilizó en la reconstrucción de precipitación (Fig. 3).

Reconstrucción de la precipitación

La relación entre la cronología residual de madera temprana y la precipitación enero-agosto período 1968-1998, produjo una correlación de 0.72 ($p < 0.01$), lo cual implica que los crecimientos de la madera temprana, explican 52% de la variación en la precipitación que ocurre en dicho período (Fig. 4).

Del programa Verify, se determinó que la prueba de calibración, realizada en la mitad de los registros de precipitación disponible (1968-1998), mostró una asociación significativa con la versión residual de la cronología EWI ($r = 0.70$, $p < 0.004$, $n = 15$, 1984-1998); una situación similar ocurrió con el período 1968-1983, utilizado con fines de verificación, donde la correlación también fue significativa ($r = 0.80$, $p < 0.0006$, $n = 15$). Los estándares estadísti-

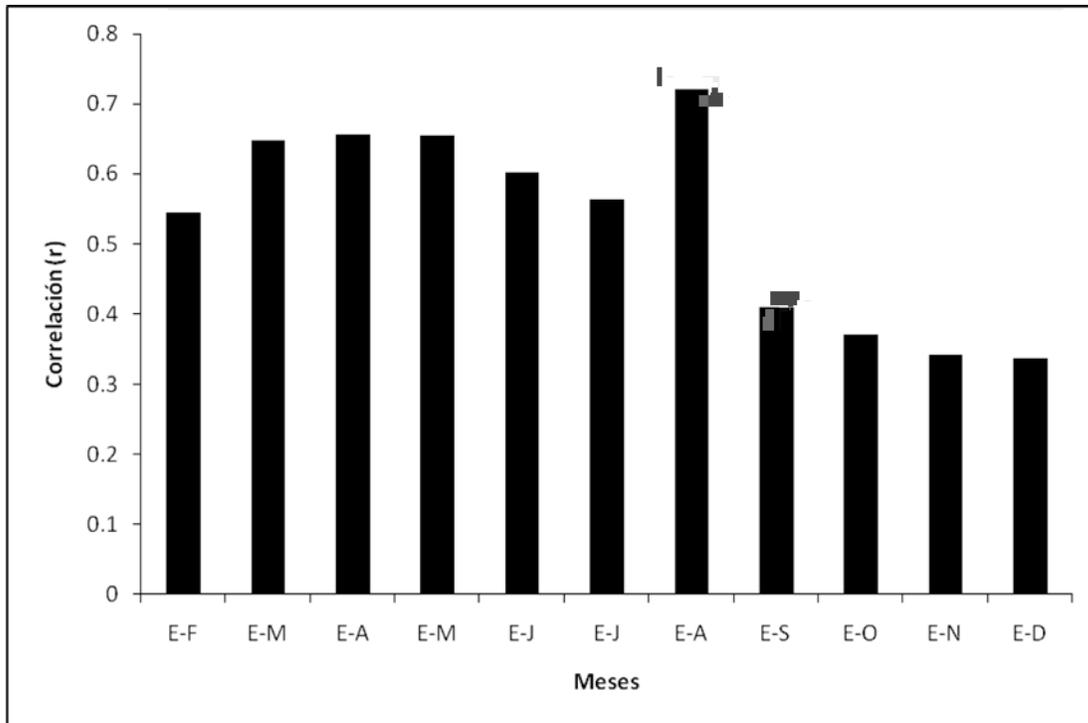


FIGURA 3. Función de respuesta entre la precipitación estacional para diversos sub-períodos y la cronología residual EW de *P. durangensis* del sitio Las Minitas, Pueblo Nuevo, Durango.

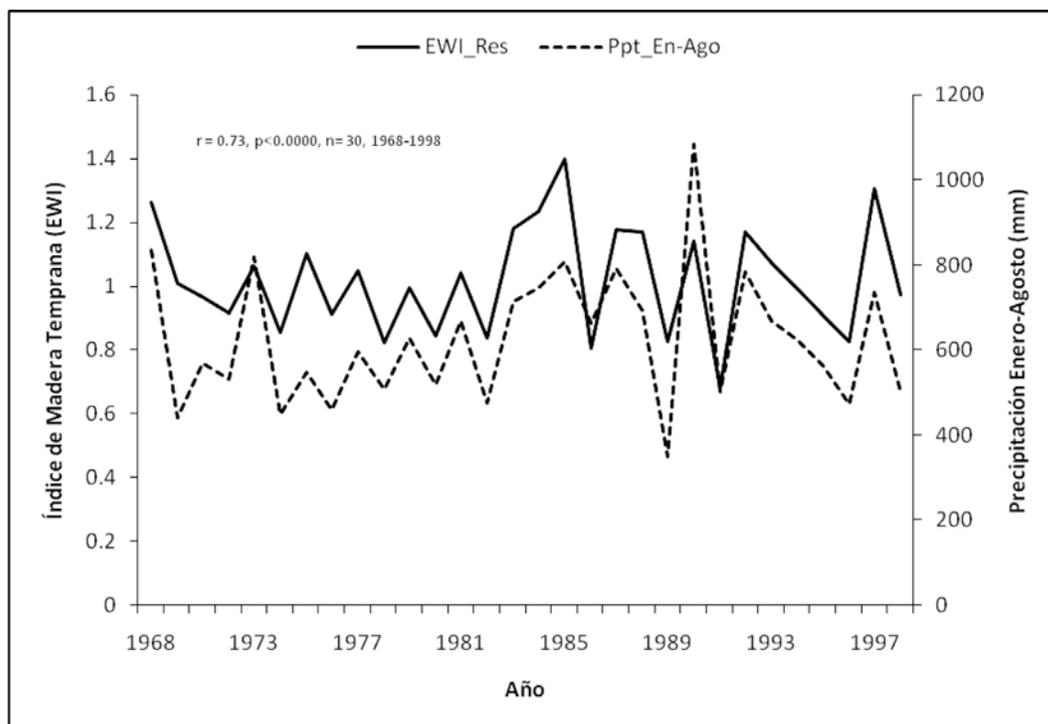


FIGURA 4. Relación entre el índice de madera temprana y la precipitación acumulada enero-agosto con registros de las estaciones meteorológicas El Salto, Las Bayas, Navios y San Dimas, período 1968-1998.

cos involucrados en el análisis soportan su validez, por lo que se utilizó el período de 1968 a 1998 para generar la ecuación de regresión con fines de reconstrucción (Tabla 2). La ecuación de regresión lineal fue la siguiente:

$$Y_i = -39.513636383 + 648.65563X_i$$

Donde:

Y_i = Valor reconstruido de precipitación estacional para un año determinado

X_i = Índice de madera temprana de la cronología residual (EWI)

El período reconstruido de la precipitación se extendió de 1780 a 2012 (Fig. 5), en este tiempo se observan sequías recurrentes, intensas y prolongadas; así en el siglo XVIII la más severa se presentó en la década de 1790, aunque fueron más frecuentes en los siglos XIX (1800, 1820, 1840, 1860, 1860, 1890) y XX (1900, 1920, 1950, 1970, 1990, 2000). Los períodos húmedos fueron menos frecuentes, de menor extensión y los años extremadamente húmedos ocurrieron en 1793, 1814, 1827, 1884, 1968, 1985 y 1997 (Fig. 5).

Las reconstrucciones dendroclimáticas fundamentadas en modelos de regresión generalmente tienden a minimizar los períodos e intensidad de eventos secos y húmedos, ya que los modelos explican menos de 100% de la varianza observada en los datos climáticos instrumentales (Cleaveland *et al.*, 2003). Sin embargo, las recons-

trucciones dendroclimáticas y datos procedentes de archivos históricos en la región, señalan la presencia de sequías en gran parte de los períodos detectados en esta reconstrucción, caso específico las sequías de las décadas de 1790, 1860, 1890, 1900, 1920, 1950 y 1990 (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 20003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005); así por ejemplo, los años de 1785 y 1786 se conocen como “*El Año del Hambre*” por la sequía intensa y presencia de heladas tempranas que mermaron la producción de maíz en el Valle de México (Florescano, 1980). Esta sequía no solo afectó el centro de México, si no que se extendió hasta gran parte del norte de México, como lo indican diversas reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas para los estados de Durango y Chihuahua (Villanueva *et al.*, 2009) y archivos históricos de la Cd. de Chihuahua (Endfield y Fernández, 2004; Contreras, 2005).

Las sequías registradas en 1801-1805, 1819-1824 y 1893-1898 son consistentes con las estimadas en reconstrucciones de precipitación invierno-primavera y reconstrucciones de flujo en la cuenca del río Nazas, Durango (Villanueva *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2012). Los eventos extremos no solo afectaron a los ecosistemas, también tuvieron una gran repercusión en la población humana; por ejemplo, en la década de 1950 se registró una de las peores sequías del siglo XX. Este evento provocó el inicio del proceso masivo de migración de las áreas rurales hacia el extranjero, a países como los Estados Unidos para emplearse como “braceros” para traba-

TABLA 2. Estadísticos derivados de las pruebas de calibración, verificación entre la cronología EWI y precipitación estacional enero-agosto.

Período	Correlación Pearson ¹	Reducción del Error ²	Valor T ³	Producto de signos ⁴	Primera diferencia significativa ⁵
1968-1983	0.78*	0.437*	3.82*	1*	0*
1984-1998	0.70*	0.678*	4.63*	3*	1*

¹ Medida de la relación entre dos variables aleatorias cuantitativas y es independiente de la escala en las que estén medidas; ² Primera diferencia de los datos observados y reconstruidos ($t - t_i$), la transformación remueve tendencias que pueden afectar el coeficiente de correlación (Fritts, 1976); ³ Valores de la prueba de “t” entre las medias de los valores observados y reconstruidos; ⁴ Valores de salida de la media de cada serie (Fritts, 1976); ⁵ Cualquier valor positivo indica que la reconstrucción contribuye únicamente con información paleoclimática.

* significativo, $p < 0.05$.



jos agrícolas (Florescano *et al.*, 1995; Cleaveland *et al.*, 2003; Sánchez *et al.*, 2012). Las sequías de las últimas décadas como las ocurridas en las décadas de 1970, 1980, 1990 y de 2007 a 2013 documentadas con registros climáticos, hidrométricos y con datos de producción de alimentos (Inegi, 2013); también son registradas por la red dendroclimática disponible para el norte de México, que clasifica a estos años como muy secos. A su vez, esta red también identifica secos a los años 2011 y 2012, donde la sequía magnificó su efecto cubriendo varios estados del norte de México, lo que ocasionó reducción en la producción de alimentos e incrementó la mortandad de ganado (Giner *et al.*, 2011).

Los períodos húmedos fueron menos frecuentes en esta reconstrucción, generalmente no se expresan con la intensidad que se presentaron históricamente, ya que el mayor énfasis está dado por períodos críticos de sequías severas y los períodos de bonanza pueden pasar desapercibidos. Por otra parte, eventos muy lluviosos no son detectados detalladamente por los anillos de los árboles ya que, algunas veces, estos se presentan después de que el anillo de crecimiento se ha formado completamente, aunque mucha de esta humedad queda almacenada en el suelo favoreciendo el crecimiento del anillo en el año siguiente (Fritts, 1976). No obstante, la reconstrucción indicó la presencia de períodos húmedos, como la década de 1830, registrándose también en gran parte de los EUA (Fye *et al.*, 2003). Este período también se ha caracterizado por presentar una baja frecuencia de incendios forestales (Yocom *et al.*, 2010). Algunos años con escurrimientos extraordinarios detectados en esta reconstrucción, se han observado en reconstrucciones de flujo para cuencas en la Sierra Madre Occidental que drenan tanto hacia la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense como hacia la Costa del Pacífico (Cerano *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2005, Villanueva *et al.*, 2014).

El comportamiento de la variabilidad climática en esta región, está determinado por diversos fenómenos atmosféricos circulatorios y uno de los más importantes es ENSO, en particular, durante su fase cálida, que se

caracteriza por un incremento en la precipitación invernal (Stahle *et al.*, 1998; Stahle *et al.*, 2011). Por el contrario, durante la fase fría se presentan sequías, en ocasiones con varios años de duración (Magaña *et al.*, 2004; Seager *et al.*, 2009). Un comportamiento totalmente opuesto ocurre en el centro de México, donde en años de El Niño se presentan sequías severas, mientras que en años de La Niña, la lluvia está por encima del promedio histórico. Se ha indicado que el dipolo entre condiciones húmedas y secas es justamente el Trópico de Cáncer (Therrell *et al.*, 2002; Yocom *et al.*, 2010). Si bien parece que esta zona geográfica no ha sido estática y ha cambiado de latitud a través del tiempo, además de que no siempre esta dipolaridad tiene el mismo patrón de comportamiento (Stahle *et al.*, 2011).

Al comparar la cronología regional EWI e índices del SOI, como los generados por Allan *et al.* (1996), National Climatic Data Center (NOAA, 2014), Índice de Lluvia Tropical (TRI) (Wright, 1979), Índice Multivariado de ENSO (MEI) (NOAA, 2014) y los reconstruidos para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998), se encontró una asociación significativa entre ambas variables, que no superó $r = -0.52$ ($p < 0.01$) (Tabla 3). Esta correlación fue menor a la observada en cronologías regionales, las cuales captan una mayor variabilidad del impacto de este fenómeno a nivel región hidrológica (Cleaveland *et al.*, 2003). La relación entre los índices EWI y SOI para el período invernal fue inversa, indicando un efecto negativo durante la fase cálida de El Niño. Sin embargo, la asociación fue positiva con los índices TRI y MEI, ya que el primero considera la cantidad de lluvia en milímetros y el índice MEI tiene invertidos los signos con valores positivos durante la fase de El Niño y negativos durante La Niña, no obstante que, el fenómeno que se analiza es el mismo (Wolter y Timlin, 2011).

El fenómeno del Monzón de Norteamérica (NAMS) es el que más influye en la precipitación de verano en esta región, pero su variabilidad interanual es menor (Douglas *et al.*, 1993). En este estudio no se encontró una relación significativa entre la serie dendrocronológica de madera tardía y la precipitación de verano.

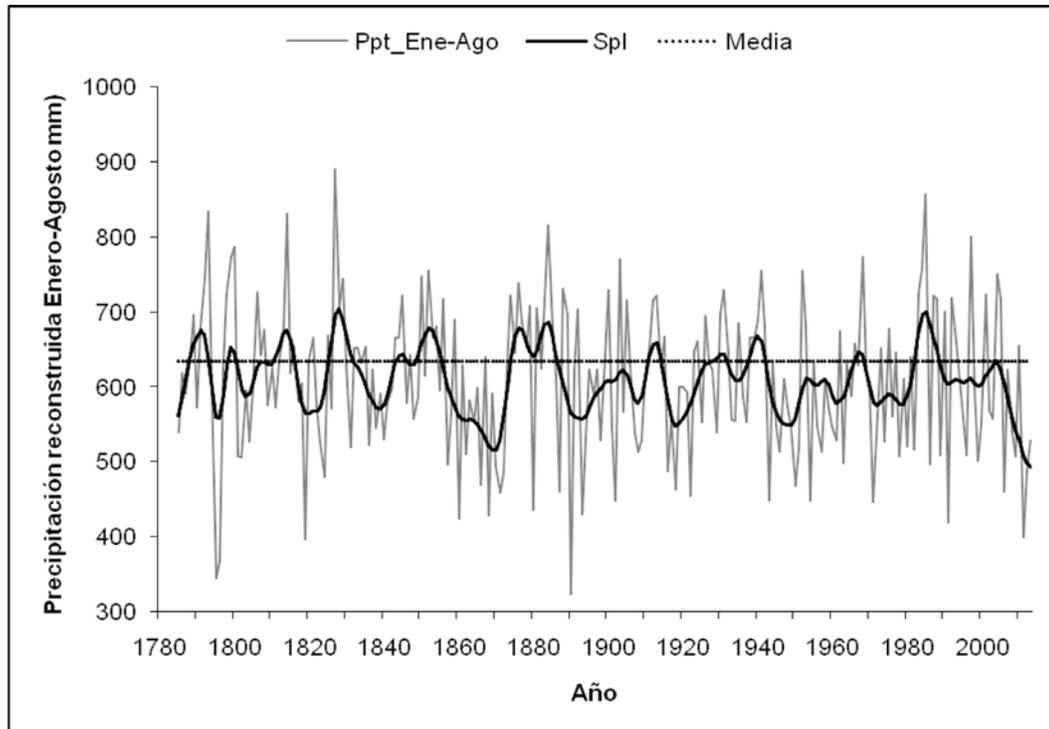


FIGURA 5. Precipitación reconstruida estacional enero-agosto para la parte alta de la región hidrológica Presidio San Pedro. La reconstrucción se extiende de 1785 a 2012. La línea gris son los valores de precipitación enero-agosto y la línea oscura, representa una línea flexible suavizada (spline) para resaltar eventos de baja frecuencia a nivel década.

TABLA 3. Relación ente la cronología de madera temprana del sitio las Minitas, Pueblo Nuevo, Durango y los índices estacionales promedio SOI del período invierno-primavera.

Variable	Período (años)	Correlación ($p < 0.01$)	Fuente
¹ SOI Reconstruido (Dic-Feb)	1785 -1977 (272)	- 0.39	Stahle <i>et al.</i> (1998)
² Allan SOI invernal (Dic-Feb)	1876 -1996 (121)	- 0.52	Allan <i>et al.</i> (1996)
³ TRI Enero-Abril	1895 -1995 (101)	0.43	Wright (1979)
⁴ MEI Enero-Abril	1871-2005 (125)	0.43	Wolter y Timlin (2011)
⁵ SOI Noviembre-Febrero	1877-2013 (134)	- 0.52	NOAA (2014)

¹SOI reconstruido (Dic-Feb): índices SOI reconstruidos de una red dendrocronológica de Norte América (Stahle *et al.*, 1998); ²Allan SOI (Dic-Feb): índices de SOI derivados de la diferencia de presión de la temperatura de agua del mar entre las islas de Tahiti y Darwin (Allan *et al.*, 1996). ³TRI: Índice de Lluvia Tropical, estimación de la variabilidad de ENSO al involucrar anomalías de precipitación en el Pacífico central (Wright, 1979); ⁴MEI: Índice Multivariado de ENSO, involucra presión al nivel del mar, velocidad del viento, temperatura del agua y del aire y nubosidad en el Pacífico central (Wolter y Timlin, 2011). ⁵SOI Enero-Abril, índice que considera diferencia de presión en el Pacífico central. Valores negativos por debajo de -8 indican episodios El Niño (NOAA, 2014).

CONCLUSIONES

Los parámetros dendrocronológicos de *Pinus durangensis* derivados de los programas COFECHA y ARSTAN constatan el alto potencial de la especie para generar series de anillo

total, madera temprana y tardía, climáticamente sensitivas, como lo indican valores adecuados de inter-correlación entre series (0.463), sensibilidad media (0.309), autocorrelación de primer orden (0.41) y relación señal-



ruido (5.24); valores que son similares a otras especies de uso común en estudios dendrocronológicos para el norte y centro de México.

La extensión de las series dendrocronológicas fue de 232 años (1785-2012), esto implica que la longevidad de la especie al menos puede alcanzar más de dos siglos, lo que la hace de alto valor científico para extender la información climática en el tiempo.

La serie de madera temprana respondió significativamente a la precipitación acumulada enero-agosto, precipitación que representa entre 65 y 75% de la precipitación total anual en esta región y que alimenta el sistema hidrológico Baluarte, uno de los ríos del que depende el ecosistema de estuarios de Marismas Nacionales en los estados de Sinaloa y de Nayarit.

Los períodos de secos y húmedos reconstruidos en el presente estudio han sido observados en otras reconstrucciones regionales, lo que es de gran valía paleoclimática, ya que corrobora que estos fenómenos se extendieron en grandes superficies incluyendo la parte alta de la región hidrológica Presidio San Pedro.

La variación interanual de la precipitación invierno-primavera observada en esta reconstrucción tiene alta influencia de ENSO y el entendimiento de su comportamiento, es de gran relevancia con fines de la planeación y manejo de los recursos hídricos, los cuales son esenciales con fines agropecuarios y para conservación de ecosistemas con alta biodiversidad como lo es Marismas Nacionales.

La falta de asociación significativa entre la precipitación de verano, donde ocurre más de 70% de la precipitación anual, y la serie dendrocronológica de madera tardía es un indicativo de la escasa variabilidad hidroclimática que se presenta durante esta estación del año.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) CENID-RASPA, en Gómez Palacio, Durango, gracias al financiamiento otorgado a través del proyecto "Influencia de patrones atmosféricos circulatorios en la frecuencia de incendios

forestales en la Sierra Madre Occidental. También se agradece a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) y al Instituto Tecnológico de El Salto (ITES) por brindarme la oportunidad de actualizarme profesionalmente, específicamente en el área de dendrocronología, durante mi año sabático

REFERENCIAS

- Allan, R., J. Lindesay y D. Parker. 1996. El Niño/Southern Oscillation & climate variability. CSIRO Publishing. Atmospheric Research. Australian National University. United Kingdom, Meteorological Office. 408 p.
- Armendariz Olivares R., A. Quiñonez Ch., M. Cano R., P. Juárez T., H.O. Rubio A. y J. Rentería A. 2003. Tablas de volúmenes para *Pinus herrerae* y *Pinus durangensis* en el ejido Monteverde, municipio de Guazapares, Chihuahua. Folleto Técnico No. 21. Inifap-Cirnoc. 28 p.
- Bradley, R. 1999. Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary. 2a ed. International Geophysics Series, Vol. 68. Elsevier Academic Press. Amsterdam. 614 p.
- Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, J.G. Arreola-Ávila, I. Sánchez-Cohen, R.D. Valdez-Cepeda y G. García-Herrera. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15(2):27-44.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva D., R.D. Valdez C., V. Constante G., J.L. González B. y J. Estrada A. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(10):7-23.
- Cleaveland, M.K., D.W. Stahle, M.D. Therrell, J. Villanueva D. y B.T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59:369-388
- Comisión Nacional del Agua. 2012. Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México. Semarnat. México, D.F. 76 p.
- Constante G, V., J. Villanueva D., J. Cerano P. y J. Estrada A. 2010. Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto Técnico No. 19. Inifap Cenid Raspa. Gómez Palacio, Dgo. 40 p.

- Contreras Servín, C. 2005. Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas* 56:118-133.
- Cook, E. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.
- De la Lanza Espino, G., J.L. Carbajal P., S.A. Salinas R. y J.E. Barrios O. 2012. Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 78:62-74.
- Díaz, S.C., M.D. Therrell, D.W. Stahle y M.K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research* 22:237-244.
- Douglas, M.W., R. Maddox, K. Howard y S. Reyes, 1993: The Mexican Monsoon. *Journal of Climate* 6:1665-1667.
- Endfield, G.H. e I. Fernández. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climate Change* 75:395-419.
- ERIC III. 2006. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Extractor Rápido de Información Climatológica.
- Farjon, A., J.A. Pérez y B.T. Styles. 1997. A field guide to the pines of Mexico and Central America. Kew Publishing. 147 p.
- Florescano, E. 1980. Una historia olvidada: la sequía en México. *Nexos* 32:9-13.
- Florescano, E., S. Swan, M. Menegus e I. Galindo. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. Veracruz
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press. London. 567 p.
- Fritts, H.C. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data. University of Arizona Press. Tucson, Az. 277 p.
- Fye, F.K., D.W. Stahle y E.R. Cook. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84 (7):901-909
- García A., A. y M.S. González E. 2003. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A.C. México, D.F. 187 p.
- Giner, R.A., L.C. Fierro y L.F. Negrete. 2011. Análisis de la problemática de la sequía 2011-2012 y sus efectos en la ganadería y agricultura de temporal. CONAZA, Saltillo, Coahuila. 12 p.
- González-Elizondo, M., E. Jurado, J. Navar, M.S. González-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre y J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213:39-53
- Grissino-Mayer, H.D. 2001. Evaluating cross dating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2):205-221.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69 - 78
- Inegi. 2009. Cartas temáticas del estado de Durango. Aguascalientes, Agsc. México
- Inegi. 2013. Panorama agropecuario en Durango: Censo agropecuario 2007. México, D.F.
- IPCC. 2014. Climate change: mitigation of climate change. IPCC working group III contributions to AR5.
- Lammertink, J.M., J.A. Rojas-Tome, F.M. Casillas-Orona y R.L. Otto. 1997. Situación y conservación de los bosques antiguos de pino-encino de la Sierra Madre Occidental y sus aves endémicas, Consejo Internacional para la Preservación de las Aves, Sección Mexicana, México, D.F. 103 p.
- Magaña R., V., ed. 2004. Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p.
- NOAA. 2014. Southern Oscillation Index (SOI. <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/soi.php>. Agosto 18, 2014.
- Robinson, W.J. y R. Evans. 1980. A microcomputerbased tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40:59-64.
- Sánchez C., I., U. Oswald S., G. Díaz P., J. Cerano P., M.A. Insunza I., R. López L. y J. Villanueva D. 2012. Forced migration, climate change, mitigation and adaptation policies in Mexico: some functional relationships. *Inter-*



- national Migration*, Doi: 10.1111/J. 1468-2435.2012.00743.x
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara, C. Lie, E. Cook y D.W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1):1-31.
- Stahle, D.W., R.D. Dárrigo, P.J. Krusic, M.K. Cleaveland, E.R. Cook, R.J. Allan, J.E. Cole, R.B. Dunbar, M.D. Therrell, D.A. Guy, M.D. Moore, M.A. Stokes, B.T. Burns, J. Villanueva-Díaz y L.G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10):2137-2152.
- Stahle, D.W., D.J. Burnette, J. Villanueva-Díaz, R.R. Heim Jr., F.K. Fye, J. Cerano P., R. Acuna S. y M.K. Cleaveland. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics*, Doi 10.1007/s00382-011-1205-z.
- Stokes, M.A. y T.L. Smiley. 1968. An Introduction to Tree-Ring Dating. University of Chicago Press, Chicago, Illinois. 73 p.
- Therrell, M.D., D.W. Stahle, M.K. Cleaveland y J. Villanueva-D. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107(D14):6-1 – 6-7.
- Villanueva-Díaz, J., B.H. Luckman, D.W. Stahle, M.D. Therrell, M.K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutierrez-García, J. Estrada-Avalos y R. Jasso-Ibarra. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrochronologia* 22(3):215-223.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, J. Estrada A. y V. Constante G. 2008. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsugamenziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. Inifap Cenid-Raspa. Gómez Palacio, Durango. 49 pp.
- Villanueva D., J., P.Z. Fulé, J. Cerano P., J. Estrada A. y I. Sánchez C. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México* 34(105):37-69.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, B.H. Luckman, M.D. Therrell, M.K. Cleaveland y P.Z. Fulé. 2011. La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas en el norte-centro de México. In: M. Caballero, B. Ortega G., comp. Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina I. UNAM, Instituto de Geofísica, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. México, D.F. p:47-72.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., J. Estrada A., V. Constante G. y D.W. Stahle. 2014. Reconstrucción de escurrimiento histórico de la cuenca alta del Río Nazas, Durango. *Revista Chapingo: Serie Zonas Áridas*. Doi. 10.5154/r.rchSZA.2012.06.036
- Wolter, K. y M.S. Timlin, 2011: El Niño/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology* 31: 14p
- Wright, P.B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277:371-374.
- Yocom, L.L., P.Z. Fulé, P.M. Brown, J. Cerano-Paredes, J. Villanueva-Díaz, D.A. Falk, y E. Cornejo-Oviedo. 2010. El Niño Southern Oscillation effect on fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 9(16):660-1671.

Manuscrito recibido el 21 de agosto de 2014.
Aceptado el 12 de noviembre de 2015.

Este documento se debe citar como:

Díaz-Ramírez, B., J. Villanueva-Díaz y J. Cerano-Paredes. 2016. Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques* 22(1):111-123.