

Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles

Recibido: 13 de febrero de 2014. Aceptado en versión final: 23 de abril de 2014.

José Villanueva Díaz*
Julián Cerano Paredes*
Peter Z. Fulé**
Citlali Cortés Montaña***
Lorenzo Vázquez Selem+
Larissa L. Yocom**
José Ariel Ruiz-Corral++

Resumen. En el noroeste de Chihuahua, sitio Mesa de las Guacamayas, catalogada como “Área Natural Protegida” (ANP) para anidamiento de la cotorra serrana, se desarrolló una serie dendrocronológica con abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) con una extensión de 409 años (1600-2008). La cronología de anillo total mostró asociaciones significativas ($r > 0.40$, $p = 0.000$) con cronologías vecinas (no separadas más de 200 km), particularmente las ubicadas en la misma vertiente de la Sierra Madre Occidental (SMO), lo que implica la influencia de patrones climáticos comunes, cuyos frentes húmedos impactan simultáneamente una extensa área del noroeste de México. Un análisis espectral de potencia indicó que los índices dendrocronológicos estuvieron afectados por ENSO y por otros patrones circu-

latorios, como se deduce de los picos espectrales dominantes (<10 años) presentes en la cronología; también mostraron asociación significativa ($r = 0.52$, $n = 111$, $p < 0.000$) con registros del PDSI para el suroeste de los Estados Unidos. Una reconstrucción de precipitación acumulada enero-julio para la misma región, mostró sequías prolongadas en los periodos 1772-1782, 1793-1803, 1999-2008 y periodos húmedos en 1742-1751 y 1809-1818. La proporción de años secos detectados en la reconstrucción, sugiere que existe 50% de probabilidad de su ocurrencia a nivel anual.

Palabras clave: *Pseudotsuga menziesii*, dendroclimatología, ENSO, PDSI, noroeste de Chihuahua.

* INIFAP CENID RASPA, Km 6.5, Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, 35140, Durango. E-mail: villanueva.jose@inifap.gob.mx; cerano.julian@inifap.gob.mx

** School of Forestry, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ 86011, EUA. E-mail: pete.fule@nau.edu; larissa.yocom@nau.edu

*** Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango (CIIDIR), Calle Sigma No. 10, Frac. 20 de Noviembre II, 34220 Durango, México. E-mail: taxodium@gmail.com

+ Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. Tel. E-mail: lselem@igg.unam.mx

++ INIFAP, C.E. “Altos de Jalisco” CIRPAC, Km. 8, Carretera Libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, 47600, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. E-mail: ruiz.ariel@inifap.gob.mx

Cómo citar:

Villanueva D., J., Cerano P., P. Z. Fulé, C. Cortés M., L. Vázquez S., L. L. Yocom y J. A. Ruiz C. (2015), “Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 87, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 141-153, dx.doi.org/10.14350/rig.44485.

Four centuries of reconstructed hydroclimatic variability for Northwestern Chihuahua, Mexico, based on tree rings

Abstract. A Douglas-fir chronology with a length of 409 years (1600-2008) was developed for northwestern Chihuahua in Mesa de las Guacamayas, a “Natural Protected Area” known as an important nesting habitat for the thick-billed parrot (*Rhynchopsitta pachyrhyncha*) an endangered neotropical bird. Increment cores and cross-sections from selected Douglas-fir trees (*Pseudotsuga menziesii*) in a mixed conifer forest were obtained with an increment borer and a chain-saw. Standard dendrochronological techniques were used to process and date each one of the rings to their exact year of formation. The quality of dating of the measured series was analyzed with the COFECHA program, while biological trends not related to climate (age differences, stem-size increases, and disturbances) were removed by standardization procedures in the ARSTAN program. Tree ring series of earlywood, latewood and total ring width were developed for the last four centuries. The total ring-width chronology was significantly associated ($r>0.40$, $p=0.000$) with nearby chronologies, particularly those located <200 km apart along the western slopes of the Sierra Madre Occidental (SMO) observing correlations as high as 0.69 ($p<0.001$). Association between chronologies decreased for those sites in the state of Durango along the SMO but separated more than 200 km in straight line and also for sites in nearby borderline in the USA side. The similar climatic response among distant chronologies implies the influence of common atmospheric circulatory patterns affecting a large portion of land simultaneously. ENSO is one of the most important factors in determining inter-annual and multiannual hydroclimatic variability in northern Mexico, increasing winter-spring precipitation in its warm phase and causing extreme droughts in its cold phase. A negative relationship ($r = -0.4$, $n= 106$, $p<0.0000$) was found between average January-May Southern Oscillation Index (SOI) and earlywood indices corroborating the significant influence of ENSO in cool season precipitation for this region. A power spectral analysis of the seasonal winter-spring precipitation reconstruction detected the presence of significant peaks ($p<0.05$) <10 years (5, 10 years) commonly associated to ENSO. Significant frequencies at 50 and near 100 years have also been related to the ENSO influence. 50-year frequency droughts historically have caused intense and prolonged droughts in northern and central Mexico, particularly those in the periods 1613-1617, 1666-1673, 1728-1733, 1752-1761, 1840-1845, 1862-1866, 1934-1939, 1944-1951, and 1953-1957. The ring-width index values were

significantly associated ($r=0.52$, $n=111$, $p<0.000$) with PDSI values recorded for the Southwestern region of the USA. The PDSI integrates precipitation and temperature data and is a measure of the availability of moisture for tree growth as related to average moisture conditions. The relationship between PDSI data from Arizona and New Mexico and ring-width indices from Mesa de las Guacamayas, Chihuahua is an indication that extreme climatic events extend from the Southwestern USA to northern Chihuahua and even further down in the Durango state. This behavior highlights the importance of developing a network of three ring chronologies at basin or watershed level to have a better understanding of climate dynamics. A seasonal January-July precipitation reconstruction detected intense and prolonged droughts for the periods 1772-1782, 1793-1803, and 1999-2008, where 1633 and 1954 stand out as the driest years of the reconstruction. Wet episodes were detected from 1742 to 1751 and from 1809 to 1818. Pluvials are less recorded in historical documents and tree rings are less sensible to wet episodes given that much of the precipitation for this region takes place in the summer months when earlywood formation that makes most of the ring size has ceased. In addition, much of the rain is lost by runoff as its intensity exceeds soil infiltration rate and water holding capacity of the soil is overridden. Historical droughts have had a severe impact in food production, reducing grain availability, increasing livestock mortality, and producing famine. The drought documented for the period 1613 to 1626 has been detected in Durango, Chihuahua and New Mexico. Later droughts like one in the 1720's, end of the 1730's and early part of the 1740's produced grain scarcity and famine in a great portion of northern Mexico. The drought of the 1950's extended all over northern Mexico and southwestern USA producing economical crisis in rural areas and greatly increased immigration and movement of migrant farm workers (braceros) to the USA. The proportion of dry years detected in the reconstruction suggests a 50% probability of occurrence of below average precipitation for a given year, implying that the development of a more extensive network of climate sensitive tree-ring chronologies will allow us a better understanding of climate variability in this region which is important for the management of limited water resources and for the conservation of endangered wildlife species.

Key words: *Pseudotsuga menziesii*, dendroclimatology, ENSO, PDSI, northwestern Chihuahua.

INTRODUCCIÓN

La zona limítrofe de los estados de Chihuahua y Sonora es de gran importancia ecológica, al constituir un corredor biológico entre los ecosistemas del norte y del sur, poseer alta biodiversidad y ser hábitat de especies endémicas o sitios de anidamiento de aves amenazadas o en peligro de extinción (Cruz, 2010), situación que es favorecida debido a su grado de disturbio relativamente menor en comparación con otros bosques de coníferas de la Sierra Madre Occidental (SMO), donde los bosques maduros han prácticamente desaparecido (Lammertink *et al.*, 1998) y existe limitada disponibilidad de registros climáticos (CNA-SMN, 2012). Esta situación restringe el estudio de la variabilidad climática, fundamental para el análisis de tendencias hidrolimáticas e impacto de fenómenos atmosféricos circulatorios. Una de las opciones para generar información paleoclimática es el uso de fuentes indirectas o *proxys* del clima, que como los anillos de los árboles, son de alta resolución, ya que sus bandas de crecimiento anual, se datan con exactitud al año de su formación (Douglas, 1941).

En la zona fronteriza de Chihuahua y Sonora, la generación de series dendrocronológicas es limitada, a diferencia de la parte correspondiente a

los Estados Unidos de América, donde desde hace décadas una red dendrocronológica se ha consolidado con este fin (NOAA/National Weather Service, 2012). La generación de series dendrocronológicas en el lado mexicano puede contribuir a mejorar el entendimiento de la variabilidad hidrolimática que experimenta la SMO y a determinar la extensión e intensidad del impacto de fenómenos circulatorios que afectan el clima del norte de México y suroeste de los Estados Unidos.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una serie dendrocronológica con fines paleoclimáticos en la región limítrofe de los estados de Chihuahua y Sonora y determinar su variabilidad, tendencias e impacto de patrones atmosféricos circulatorios

METODOLOGÍA

Localización del área en estudio

El área en estudio se ubica en Mesa de las Guacamayas (MDG), un sitio montañoso en la porción noroccidental del estado de Chihuahua, localizado a solo 80 km al sur de la frontera con los Estados Unidos y a 150 km de “Las Chiricahuas”, una montaña aislada ubicada en el sureste de Arizona (Figura 1). El área muestreada se encuentra a una altitud entre 2 270 y 2 665 msnm.

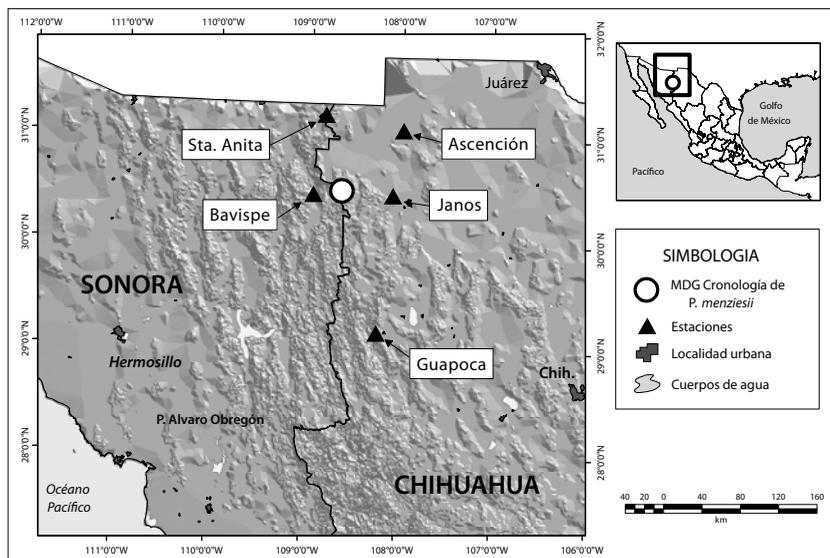


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de muestreo Mesa de las Guacamayas (círculo) en el estado de Chihuahua y estaciones climáticas aledañas (triángulos).

El material parental del área es volcánico y el suelo se compone por una mezcla de litosoles, feozem háplico y regosoles de textura media (I+Hh+Re/2). El clima es del tipo C(E)(w₁)(x'), es decir, templado subhúmedo con lluvias de verano y una precipitación anual entre 550 a 600 mm (INEGI, 2003). La vegetación del sitio es bosque de pino-encino, sujeto a pastoreo, aunque algunos rodales han sido aprovechados para extracción de madera (Cortés *et al.*, 2012).

Selección de arbolado, obtención de muestras y desarrollo de una cronología

En el área en estudio se ubicaron rodales de bosque mixto integrado por *Pinus ayacahuite*, *Pinus durangensis*, *Populus tremuloides*, *Juniperus depeana*, *Cupressus arizonica*, con presencia de *Pseudotsuga menziesii* en cañadas y sitios con mayor disponibilidad de humedad (Domínguez, 1994). Los árboles seleccionados están situados en pendientes fuertes, con suelos someros y poco disturbio. Con una barrena tipo Pressler se obtuvieron de dos a tres radios (virutas, incrementos) por árbol. El muestreo se realizó en noviembre de 2002 y en junio de 2009, años en los que se perforaron más de cien individuos vivos y se obtuvieron secciones transversales de árboles muertos en pie, tirados o de tocones de aprovechamientos previos.

Los núcleos de crecimiento se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera, posteriormente, se pulieron con lija de granulometría gruesa a fina. En el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP (Gómez Palacio, Durango), los anillos de crecimiento se contaron y fecharon con técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). Posteriormente, el grosor de cada crecimiento individual (anillo total, madera temprana y tardía) se cuantificó con un sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans, 1980). El fechado y medición de cada banda de crecimiento se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino, 2001).

Las tendencias biológicas no relacionadas con el clima, se removieron con el programa ARSTAN. Esto creó una serie de índices normalizados (Índice de Ancho de Anillo, IAA) con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987). A los valores

se les ajustó una curva flexible suavizada (spline) a nivel década, para resaltar eventos de baja frecuencia (Cook y Peters, 1981).

Reconstrucción de la precipitación

La respuesta en crecimiento de la cronología MDG en relación con otras vecinas, localizadas en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos, se determinó mediante un análisis de correlación; donde las mayores asociaciones se representaron con círculos grandes y con más pequeños las de menor magnitud. La cronología MDG también se comparó contra la serie reconstruida del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) para la división climática 08 de Nuevo México (NOAA, WDC for Paleoclimatology, 2012).

Para cuantificar la respuesta de la cronología de *Pseudotsuga menziesii*, ésta se correlacionó con registros de lluvia de estaciones climáticas aledañas al sitio de colecta. Con la subrutina VFY de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés) se analizó el proceso de calibración-verificación (Fritts, 1991). Finalmente, se obtuvo una ecuación de transferencia para el periodo total de datos de precipitación disponible, modelo utilizado para generar la reconstrucción de precipitación del noroeste de Chihuahua. A la serie de alta frecuencia (resolución anual), se le ajustó una curva flexible (*spline*) de baja frecuencia para resaltar eventos secos o húmedos presentes en la reconstrucción (Cook y Peters, 1981).

Los periodos de sequía detectados en la reconstrucción se validaron con documentos históricos; así mismo, se comparó con datos instrumentales del PDSI para el suroeste de los Estados Unidos y con reconstrucciones dendroclimáticas de precipitación desarrolladas previamente para otros sitios en Chihuahua y Durango.

El comportamiento de la serie reconstruida se determinó mediante un análisis espectral de frecuencias, en que los picos significativos se identificaron con base en las frecuencias dominantes conocidas de patrones atmosféricos circulatorios; caso específico El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), fenómeno que impacta

la variación hidroclimática en el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Serie dendrocronológica y reconstrucción de la precipitación

Se generaron tres cronologías (anillo total, madera temprana y tardía) de *Pseudotsuga menziesii* con una extensión de 409 años (1600-2008; Figura 2). El número de series involucradas en el desarrollo de la cronología fue de 70 radios o virutas, procedentes de 63 árboles. Al comparar la cronología de anillo total de MDG contra algunas de Durango y Coahuila en la parte mexicana y de Texas y Nuevo México en los Estados Unidos, se determinó que aquéllas ubicadas en Chihuahua, particularmente en la misma vertiente de la SMO, mostraron las mayores correlaciones con valores hasta de 0.69 ($n= 230$, $p<0.000$). Estos valores decrecieron y alcanzaron los valores mínimos (0.1 – 0.19) para cronologías más distantes en Durango y Coahuila. Para el caso de las cronologías en Nuevo México y Texas, la mayor correlación ($r= 0.42$, $n= 393$, 1600-1992; $p<0.0000$) se obtuvo con la cronología del Malpaís (MAP; Figura 3).

El comportamiento encontrado sugiere que aquellos sitios relativamente cercanos, localizados

en la vertiente de la SMO y que drenan hacia la planicie costera del Pacífico, como es el caso de las cronologías Las Tinajas (TIN), Maderas (MAD) y Bisaloachi (BIS), separados en línea recta de la cronología MDG a 26, 143 y 210 km, respectivamente, son afectados por sistemas climáticos comunes; entre ellos, el Monzón de Norteamérica (NAMS, por sus siglas en inglés), ENSO (Reyes *et al.*, 1994), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y Oscilación Multianual del Atlántico (Stahle *et al.*, 2011; Fulé *et al.*, 2012). En dirección hacia el sur y hacia el este, la respuesta climática disminuye, probablemente debido a efectos fisiográficos locales y a que otros fenómenos climáticos pudieran ejercer mayor influencia; así como por una respuesta diferente a ENSO en sus fases cálida y fría (Villanueva *et al.*, 2007). Estudios recientes han sugerido un cambio en la respuesta al fenómeno ENSO justo en el Trópico de Cáncer; es decir, condiciones de escasa precipitación durante la fase Niña hacia el norte de esta latitud y húmedas en el centro y sur de México (Therrell *et al.*, 2002; Seager *et al.*, 2009; Yocom *et al.*, 2010; Stahle *et al.*, 2011).

La serie dendrocronológica estándar de madera temprana, se correlacionó con datos regionales de precipitación de una serie climática integrada por las estaciones Ascención, Janos y Guapoca, Chihuahua y Santa Ana y Bavispe, Sonora (Figura 1).

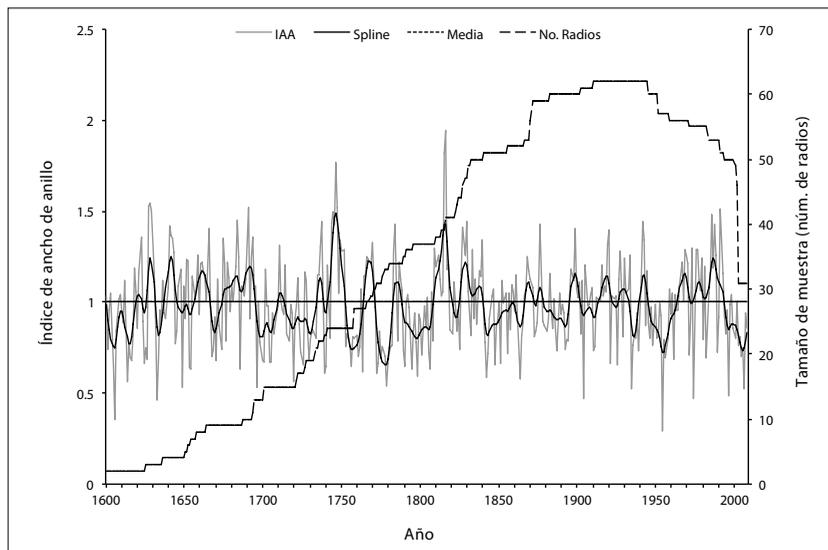


Figura 2. Cronología estándar de anillo total (IAA) y tamaño de muestra (número de radios) para cada año de la serie de tiempo del sitio MDG. Los índices fueron suavizados con una línea curva (*spline*) a nivel década.

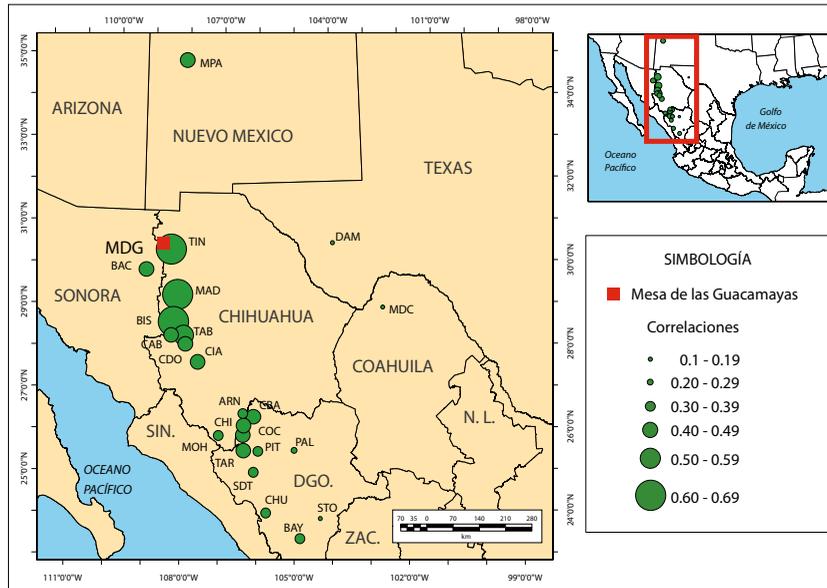


Figura 3. Asociación entre la cronología de anillo total de MDG en comparación con otras de la región, tanto para las distribuidas en México como en Estados Unidos.

El análisis de correlación para un periodo de 44 años (1954 – 1997) entre el índice de madera temprana y la precipitación estacional enero-julio, indicó una respuesta significativa ($r = 0.74$, $n = 44$; $p < 0.0000$), (Figura 4).

La serie de registro de precipitación estacional acumulada se dividió en dos subperiodos para calibración y verificación; el subperiodo 1976-1997 ($n = 22$ años) se utilizó para calibrar el modelo y el de 1954 a 1975 ($n = 22$ años) para verificación.

Debido a que la asociación para ambos subperiodos fue significativa (1954-1975, $r = 0.67$; $p < 0.0007$; 1976-1997, $r = 0.78$, $p < 0.0000$) y pasaron las pruebas convencionales de calibración-verificación (prueba de signos, prueba de “t”, prueba de medias, correlación simple) se utilizó el periodo de registros totales (1954-1997) para generar un modelo con fines de reconstrucción.

El análisis de varianza de la regresión lineal, indicó que tanto el valor de la intercepción como

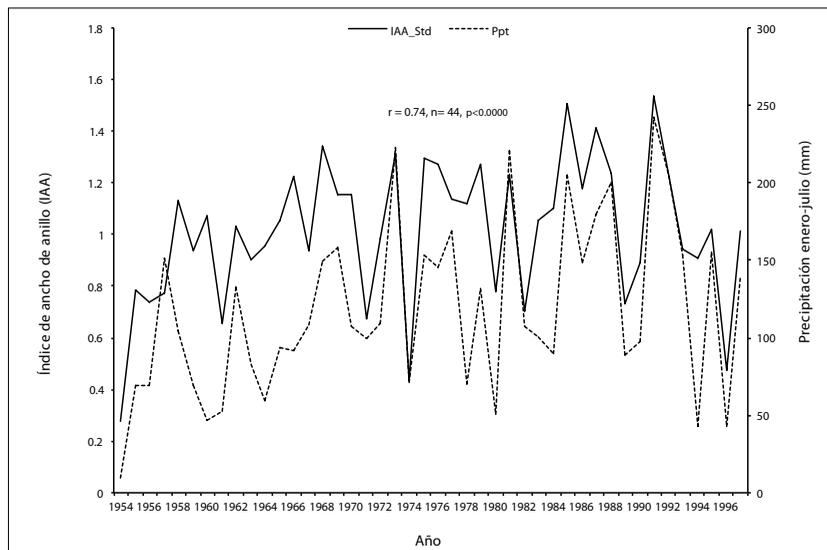


Figura 4. Comparación entre los índices dendrocronológicos estándar de madera temprana (IAA_Std) y la precipitación estacional acumulada enero-julio para el noreste de Chihuahua (Ppt).

el de la variable dependiente fueron significativos ($p < 0.01$), por lo que la ecuación lineal generada fue estadísticamente aceptable con fines de reconstrucción. La ecuación fue la siguiente:

$$Y_t = -33.1 + 149.4X_i$$

donde:

Y_t = precipitación acumulada del periodo enero-julio,

X_i = índice de madera temprana, derivado del proceso de estandarización,

-33.1 es la intersección al eje de las "X" y 149.4 es la pendiente de la recta.

La ecuación lineal se aplicó a los índices de madera temprana para generar la reconstrucción de lluvia acumulada estacional del periodo enero-julio (Figura 5).

Comparación entre los índices dendrocronológicos estándar de madera temprana (IAA_Std) y la precipitación estacional acumulada enero-julio para el noreste de Chihuahua (Ppt).

En los 409 años (1600-2008) reconstruidos, se ubicaron periodos en que la precipitación fue superior o inferior a la media reconstruida (Cuadro 1). De esta manera se detectaron sequías en un rango de uno a más de diez años consecutivos, donde 1633 y 1954 fueron los más secos en toda la re-

construcción. Dos de los periodos más húmedos se registraron de 1742 a 1751 y de 1809 a 1818, donde 1629, 1746 y 1816 fueron muy lluviosos; mientras que sequías marcadas ocurrieron en los periodos 1702-1705, 1752-1761, 1772-1782, 1793-1803, 1944-1951 y 1999-2008. Así mismo, 208 años (51%) tuvieron precipitación inferior a la media reconstruida (113.1 mm) y 196 años (48%) la excedieron, lo cual sugiere que la probabilidad de que un año específico sea seco, supera el 50%.

Datos de archivos históricos indican que la sequía afecta de manera frecuente el estado de Chihuahua, particularmente cuando estos eventos se presentan durante años consecutivos, produciendo crisis generalizada, mortandad de ganado y escasez de alimentos. Tal es el caso de las sequías ocurridas a mitad de la década de 1720, finales de 1730, principios de 1740, entre 1748 y 1766; primeros tres años de la década de 1770, mediados de la década de 1780, primeras dos décadas del siglo XIX; y en el siglo XX, las décadas de 1930, 1950 y 1990 (Endfield y Fernández, 2006).

Las sequías del periodo 1613-1626 se ha reportado en reconstrucciones paleoclimáticas para el estado de Durango (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005) y para Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.* 2009); mientras que en los Estados Unidos también se encuentra presente para el oeste de Nuevo Mexico (Stahle *et al.*, 2009).

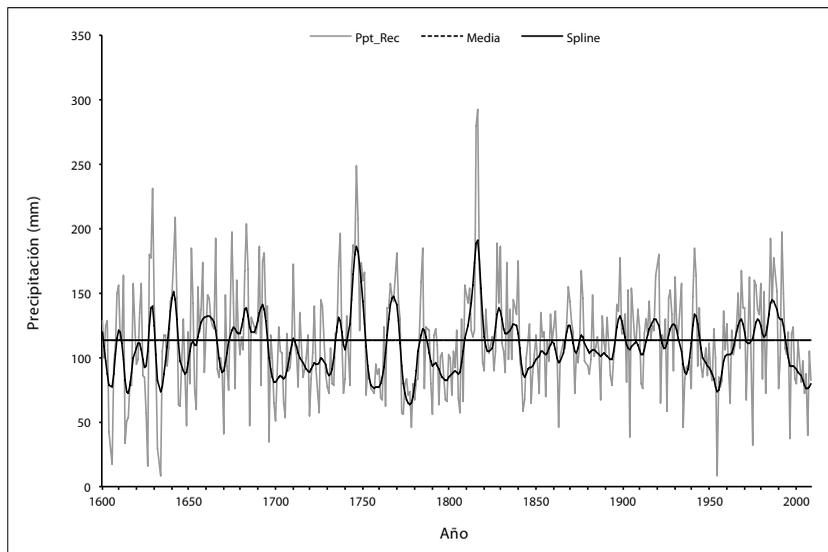


Figura 5. Reconstrucción de precipitación acumulada enero-julio (Ppt_Rec), 1600-2008, para el noroeste de Chihuahua. La curva suavizada (*spline*) a nivel década resalta eventos de baja frecuencia. La media corresponde a un valor de 113.1 mm.

Cuadro 1. Años reconstruidos con ocurrencia de sequías y periodos húmedos en la región limítrofe del noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora

Duración del evento	Periodos secos (años) ¹
1 año	1601, 1650, 1659, 1676, 1679, 1681, 1685, 1696, 1742, 1763, 1785, 1808, 1823, 1834, 1836, 1851, 1859, 1902, 1904, 1921, 1923, 1925, 1929, 1943, 1959, 1961, 1967, 1971, 1974, 1980, 1982, 1996
2 años	1619-1620, 1637-1638, 1644-1645, 1647-1648, 1653-1654, 1690-1691, 1739-1740, 1789-1790, 1805-1806, 1819-1820, 1883-1884, 1886-1887, 1889-1890, 1910-1911, 1963-1964, 1989-1990, 1993-1994
3 años	1698-1700, 1707-1709, 1711-1713, 1715-1717, 1719-1721, 1723-1725, 1825-1827, 1830-1832, 1847-1849, 1855-1857.
4 años	1604-1607, 1623-1626, 1631-1634, 1702-1705, 1872-1875, 1878-1881, 1892-1895
5 a 10 años	1613-1617, 1862-1866, 1953-1957, 1728-1733, 1840-1845, 1934-1939, 1944-1951, 1666-1673, 1752-1761
>10 años	1772-1782, 1793-1803, 1999-2008
	Periodos húmedos (años) ¹
1 año	1600, 1618, 1646, 1649, 1671, 1680, 1697, 1701, 1706, 1710, 1714, 1718, 1722, 1741, 1762, 1804, 1807, 1824, 1833, 1835, 1846, 1850, 1858, 1882, 1885, 1888, 1891, 1903, 1922, 1924, 1944, 1952, 1958, 1960, 1962, 1981, 1995
2 años	1602-1603, 1621-1622, 1635-1636, 1651-1652, 1674-1675, 1677-1678, 1726-1727, 1783-1784, 1791-1792, 1821-1822, 1828-1829, 1860-1861, 1876-1877, 1965-1966, 1972-1973, 1991-1992, 1997-1998
3 años	1682-1684, 1786-1788, 1837-1839, 1852-1854, 1926-1928, 1940-1942, 1968-1970
4 años	1627-1630, 1655-1658, 1692-1695, 1930-1933
5 a 10 años	1608-1612, 1639-1643, 1686-1690, 1734-1738, 1867-1871, 1905-1909, 1975-1979, 1660-1665, 1896-1901, 1983-1988, 1674-1771, 1743-1751, 1912-1920, 1809-1818

¹ Un año seco es aquel con una precipitación inferior a la media reconstruida (113.1 mm); un año húmedo es aquel con precipitación superior a dicho valor.

Las sequías de finales del siglo XVII (1682-1684, 1686-1690), reportadas en diversas reconstrucciones dendroclimáticas para Durango (Cerano *et al.*, 2012), Coahuila, Nuevo León (Villanueva *et al.*, 2007) y centro de México (Stahle *et al.*, 2011), en esta reconstrucción fueron periodos más bien húmedos, excepto 1685 que fue muy seco.

La sequía de 1950 afectó gran parte de los Estados Unidos y el norte de México (Seager *et al.*, 2005; Woodhouse *et al.*, 2012) y fue uno de los eventos climáticos que produjo crisis económica en el medio rural y constituyó un detonante para la migración de la población rural a las ciudades y hacia los Estados Unidos (Sánchez *et al.*, 2008).

Las sequías más intensas registradas en el suroeste de los Estados Unidos también impactaron el noroeste de Chihuahua, como se deduce de la asociación existente entre los registros de PDSI para la División Climática 08 en Nuevo Mexico y los índices de ancho de anillo, con una correlación de 0.52 (n= 211, 1895-2005, p<0.0000); aunque para algunos subperiodos de 25 años la correlación se incrementó hasta 0.58, en particular de 1920 a 1944. Años extremadamente secos de acuerdo con el PDSI (1904, 1921, 1934, 1954, 1980, 1989), coinciden con valores muy bajos de los índices de anillo total (Figura 6).

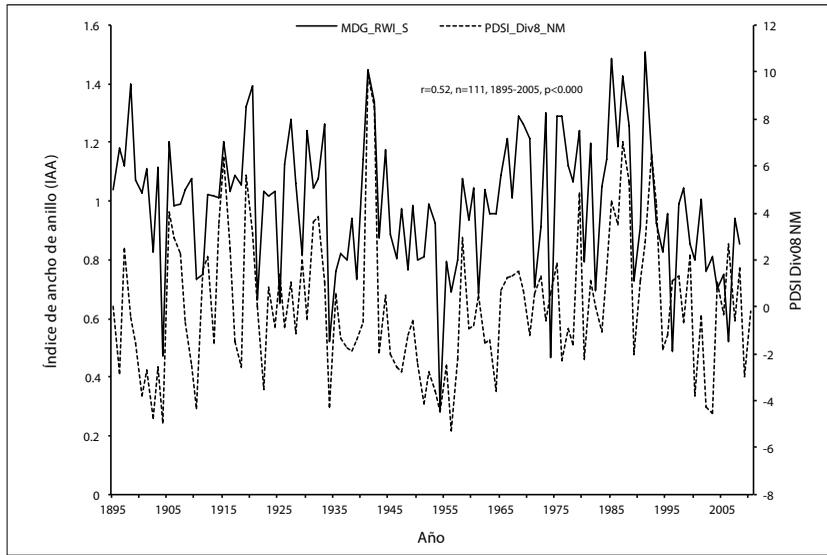


Figura 6. Relación entre los registros del PDSI de la División Climática 08 en Nuevo México (NOAA, Earth System Research Laboratory, 2013) y los índices dendrocronológicos de MDG para el periodo 1895-2005.

Los periodos húmedos de 1786-1788, 1837-1839, 1852-1854 y 1896-1901, se detectaron de manera simultánea en diversas partes de los estados de Chihuahua (Diaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009) y Durango (Cleaveland *et al.*, 2003). No obstante, los archivos históricos los describen en menor proporción, excepto en aquellos casos donde estos fenómenos produjeron inundaciones, epidemias u otras catástrofes (Florescano, 1980; García *et al.*, 2003; Endfield y Fernández, 2006). En la Región Lagunera de Coahuila y Durango, los eventos húmedos produjeron bonanza, al permitir mayor superficie irrigable e incrementar la producción del algodón (Villanueva *et al.*, 2006).

Influencia de patrones atmosféricos circulatorios

El análisis espectral de la reconstrucción de precipitación mostró la presencia de picos significativos ($p < 0.05$) en frecuencias de 5, 10, 16, 18, 20, 25, 51, 69 y 82 años (Figura 7). Algunas de estas frecuencias se repiten en reconstrucciones de precipitación para el norte de México, procedentes tanto de cronologías ubicadas en la SMO (Villanueva *et al.*, 2011) como Oriental (Cerano *et al.*, 2011a).

Frecuencias inferiores a once años se han relacionado con el efecto de ENSO (D'Arrigo *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2011), pero en reconstrucciones

milenarias se ha observado que la amplitud de este fenómeno exhibe un ciclo quasi-regular entre 50 y 90 años (Li *et al.*, 2011), situación que coincide con la frecuencia con que se presentan las grandes sequías que históricamente han afectado el norte de México y que se han presentado a mediados y finales de siglo (Cerano *et al.*, 2011b; Villanueva *et al.*, 2011). Las frecuencias de 15 a 30 y hasta 70 años se presume corresponden al PDO (Mantua y Hare, 2002).

No obstante la presencia potencial de diversos patrones circulatorios que pudieran modular la variabilidad hidrolimática en esta región, es en particular ENSO el fenómeno que tiene una mayor

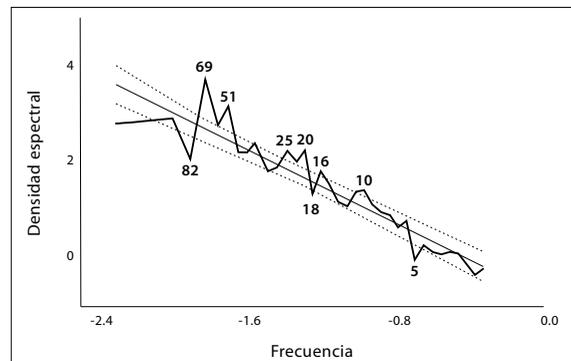


Figura 7. Densidad espectral de las frecuencias detectadas en la precipitación reconstruida para el noroeste de Chihuahua.

incidencia en la variabilidad climática interanual y multianual de esta y de otras reconstrucciones dendroclimáticas para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998), particularmente durante la ocurrencia de eventos extremos que impactan gran parte del territorio nacional (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011b; Méndez y Magaña, 2010).

El efecto de ENSO en la cronología de MDG tuvo una influencia significativa durante la estación invierno-primavera (enero-mayo), ($r = -0.4$, $n = 106$, $p < 0.0000$), con valor bajo de los índices (crecimiento reducido) durante eventos Niña (valores de SOI superiores a +8) y crecimientos superiores durante años Niño (valores sostenidos de -8 o inferiores; Figura 8). No obstante, la correlación varió en subperiodos de 21 años, con un valor de -0.51 de 1900 a 1921, -0.54 de 1922 a 1942, -0.25 de 1943 a 1963, -0.38 de 1964 a 1984, -0.37 de 1985 a 2004. Esta fluctuación en el impacto de ENSO ha sido reportada en estudios previos para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003). ENSO afecta a localidades tanto en la costa como en el interior del continente americano, con lluvias torrenciales y sequías severas que inducen pérdidas económicas cuantiosas de varios cientos de millones de dólares en los países afectados, desde Canadá, Estados Unidos, México hasta el sur de América del Sur.

La sequía que impactó al norte de México en 2011 y 2012, y que ha ocasionado una crisis económica y social en el sector agrícola y pecuario, demanda de las instituciones gubernamentales acciones de prevención y de mitigación, que puedan contribuir a estabilizar la situación y a implementar medidas de prevención en situaciones futuras de eventos de sequía y de otros fenómenos hidroclimáticos extremos. Lo anterior, requiere de un mejor conocimiento sobre la extensión de estas sequías y los probables mecanismos circulatorios que le dieron origen; información fundamental para alimentar modelos de predicción de escenarios futuros del clima en esta región del norte de México, lo que es de gran importancia para la planeación y adecuado aprovechamiento de los limitados recursos hídricos con que cuenta esta región.

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática es también importante para la conservación de bosques relictos, que constituyen sitios de anidamiento y son fuente de alimentación de especies como la cotorra serrana; información de utilidad práctica para determinar la frecuencia de reclutamiento de especies arbóreas, tasas de crecimiento y los procesos sucesionales intrínsecos, que en su conjunto moldean el hábitat requerido por la fauna que habita estos ecosistemas (Cortés *et al.*, 2012).

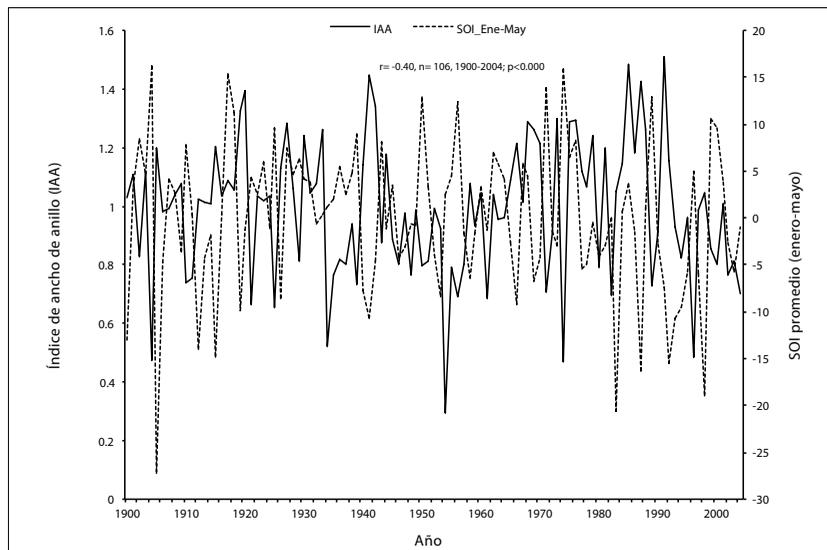


Figura 8. Relación entre los índices dendrocronológicos del sitio MDG y el promedio de los Índices de Oscilación del Sur (SOI) para el periodo enero-mayo.

CONCLUSIONES

En este estudio, mediante el fechado de los crecimientos radiales de *Pseudotsuga menziesii*, se desarrolló una serie dendrocronológica de más de 400 años de extensión (1600-2008) para el extremo noroccidental de Chihuahua, dentro del ANP “Mesa de las Guacamayas”, sitio de anidamiento de la cotorra serrana, montaña que constituye la distribución más al norte en que anida esta especie. Esta serie de tiempo es de gran relevancia científica para el análisis histórico de la variabilidad hidroclimática de esta región y para determinar la extensión e impacto que han ejercido diversos patrones circulatorios, que afectan de igual manera el suroeste de los Estados Unidos.

Los valores de correlación mostraron que existe una respuesta climática significativa al obtenerse valores de correlación hasta de 0.69, entre la cronología MDG y aquéllas ubicadas en la misma vertiente de la SMO e inclusive a distancias mayores a 200 km en línea recta. La asociación también fue significativa, aunque menor, para algunas cronologías del suroeste de los Estados Unidos.

En la reconstrucción se determinaron periodos de uno a más de diez años consecutivos, donde la precipitación estuvo por arriba o por abajo de la media; los años más secos se presentaron en 1633 y 1954. Dos de los periodos más húmedos se registraron de 1742 a 1751 y de 1809 a 1818, siendo 1629, 1746 y 1816 los años con mayor precipitación. Al cuantificar la proporción de años secos y húmedos se determinó que éstos prácticamente tienen una probabilidad de ocurrencia del 50%. Las sequías que afectan el suroeste de los Estados Unidos también se manifiestan en el noroeste de Chihuahua como lo indica la asociación significativa ($r = 0.52$) entre los índices anuales de la cronología MDG y valores registrados del PDSI para la división climática 08 de Nuevo Mexico. La variabilidad hidroclimática detectada estuvo influenciada por patrones atmosféricos circulatorios, siendo ENSO uno de los fenómenos de mayor influencia, como lo indica la relación encontrada entre los índices estacionales de ENSO (enero-mayo) y los índices de madera total de la cronología MDG. Esta asociación fue negativa, lo que indica que la fase fría (Niña)

de ENSO produce condiciones de sequía, mientras que la fase cálida (Niño) condiciones húmedas. Esta condición parece general en esta región, al encontrarse dominancias espectrales inferiores a diez años para otras reconstrucciones climáticas en el norte de México.

Los resultados generados, ponen de manifiesto la necesidad de conocer con más detalle la variabilidad hidroclimática de esta región, que es afectada por patrones circulatorios que impactan una extensa región del suroeste de los Estados Unidos y del norte de México, y que según modelos predictivos tenderá en los próximos años a sufrir sequías de mayor intensidad que afectarán los ecosistemas presentes y la fauna que todavía encuentra refugio en relictos de bosques antiguos de esta zona.

REFERENCIAS

- Cerano Paredes, J., J. Villanueva, R. Valdéz., J. Méndez y V. Constante (2011a), “Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Publicación Especial No. 2, pp. 235-249.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, R. D. Valdéz Cepeda, J. G. Arreola Ávila y V. Constante García (2011b), “El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas”, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Publicación Especial, vol. XVII, pp. 207-215.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva, R. Valdéz, V. Constante, J. L. González y J. Estrada (2012), “Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 2, núm. 10, pp. 7-23.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva Díaz and B. T. Burns (2003), “Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico”, *Climatic Change*, vol. 59, pp. 369-388.
- CNA-SMN (2012), “Estaciones climatológicas del sistema de clima computarizado (CLICOM)”, Comisión Nacional del Agua, Sistema Meteorológico Nacional, México.
- Cook, E. R. (1987), “The decomposition of tree-ring series for environmental studies”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 47, pp. 37-59.
- Cook, E. R. and K. Peters (1981), “The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior

- tree-ring width series for dendroclimatic studies”, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 41, pp. 45-53.
- Cortés Montaña, C., P. Z. Fulé, D. A. Falk, J. Villanueva Díaz and L. L. Yocom (2012), “Linking old-growth forest composition, structure, fire history, climate and land-use in the mountains of northern Mexico”, *Ecosphere*, vol. 3, no. 11, pp. 1-16.
- Cruz Maldonado, N. (2010), *Contribución a la conservación de cotorra serrana (Rhynchopsitta pachyrhyncha) mediante la caracterización y modelación de sitios potenciales de anidación en la Sierra Madre Occidental, México*, tesis de Master Scientiae en manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad, Escuela de Postgrado CATIE, Costa Rica.
- D’Arrigo, R., E. R. Cook, R. J. Wilson, R. Allan and M. E. Mann (2005), “On the variability of ENSO over the past six centuries”, *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 3, L03711, DOI: 10.1029/2004GL022055 L03711.
- Díaz, S. C., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland (2002), “Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992”, *Climate Research*, vol. 22, pp. 237-244.
- Domínguez A., F. A. (1994), *Análisis histórico-ecológico de los bosques de Pseudotsuga en México*, INIFAP, Centro de Investigación del Golfo-Centro, Campo Experimental “El Palmar”, Veracruz, México, Folleto Técnico No. 23.
- Douglass, A. E. (1941), “Crossdating in dendrochronology”, *Journal of Forestry*, vol. 39, pp. 825-828.
- Endfield, G. H. and I. Fernández (2006), “Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua”, *Climate Change*, vol. 75, pp. 391-419.
- Florescano, E. (coord.; 1980), *Análisis histórico de las sequías en México*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México, pp. 1-158.
- Fulé, P. Z., L. L. Yocom, C. Cortés Montaña, D. A. Falk, J. Cerano and J. Villanueva Díaz (2012), “Testing a pyroclimatic hypothesis on the Mexico–United States border”, *Ecology*, vol. 93, no. 8, pp. 830-840.
- Fritts, H. C. (1991), *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*, University of Arizona Press, Tucson, Az., USA.
- García Acosta, V., J. M. Pérez y A. Molina del Villar (2003), *Desastres agrícolas en México: Catálogo histórico, Tomo I, Época Prehispánica y Colonial (958 – 1822)*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Grissino Mayer, H. D. (2001), “Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA”, *Tree-Ring Research*, vol. 57, no. 2, pp. 205-221.
- Holmes, R. L. (1983), “Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement”, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 43, pp. 69-78.
- INEGI (2003), *Síntesis geográfica del estado de Chihuahua*, Instituto Nacional de Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- Lammertink, J. M., J. A. Rojas Tome, F. M. Casillas Orona y R. L. Otto (1998), *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.
- Li, J., Shang-Ping Xie, E. R. Cook, G. Huang, R. D’Arrigo, F. Liu, Jian Ma and Xiao-Tong Zheng (2011), “Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium”, *Nature Climate Change*, no. 1, pp. 114-118.
- Magaña Rueda, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez (1999), “El Niño y el clima, en Magaña Rueda, V. (ed.), *Los impactos del niño en México*, Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, pp. 23-68.
- Mantua, J. N. and S. R. Hare (2002), “The Pacific Decadal Oscillation”, *Journal of Oceanography*, vol. 58, pp. 35-44.
- Méndez, M. y V. Magaña (2010), “Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America”, *Journal of Climate*, vol. 23, no. 5, pp. 1175-1188.
- NOAA/National Weather Service, Climate Prediction Center (2012), *Southern Oscillation Index (SOI) by season. Running 3-Month Mean ONI values*. [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml].
- NOAA, WDC for Paleoclimatology (2012), *Contributors of the International Tree-Ring Data Bank, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology*, NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA [<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pdsidata.html>].
- NOAA, Earth System Research Laboratory (2013), *Dai Palmer Drought Severity Index: self calibration data* [<http://www.esrl.noaa.gov/cgi-bin/dataAccess.pl>].
- Reyes, S., M. W. Douglas y R. A. Maddox (1994), “El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVSON/SWAMP)”, *Atmósfera*, vol. 7, no. 2, pp. 117-137.
- Robinson, W. J. and R. Evans (1980), “A microcomputer-based tree-ring measuring system”, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 40, pp. 59-64.
- Sánchez Cohen, I., W. Ojeda Bustamante, G. Chebhouni, I. Orona Castillo, J. Villanueva Díaz, J. L. González Barrios y G. González Cervantes (2008), “Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos”, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XXIII, núm. 4, pp. 5-24.

- Seager, R., Y. Kushnir, C. Herweijer, N. Naik and J. Velez (2005), "Modeling of tropical forcing of persistent drought and pluvial over western North America: 1826-2000", *Journal of Climate*, vol. 18, pp. 4065-4088.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara, C. Lie, E. Cook and D. W. Stahle (2009), "Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change", *Atmósfera*, vol. 22, no. 1, pp. 1-31.
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. D. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva and L. G. Thompson (1998), "Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, no. 10, pp. 2137-2152.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, H. D. Grissino Mayer, R. D. Griffin, F. K. Fye, M. D. Therrell, D. J. Burnett, D. M. Meko and J. Villanueva Díaz (2009), "Cool- and warm-season precipitation reconstruction over western New Mexico", *Journal of Climate*, vol. 22, pp. 3729-3750.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva Díaz, R. R. Heim Jr., F. K. Fye, J. Cerano Paredes, R. Acuna Soto and M. K. Cleaveland (2011), "Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium", *Climate Dynamics*, vol. 39, no. 6, pp. 1431-1446.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley (1968), *An introduction to Tree-Ring Dating*, University of Arizona Press, Tucson, Az., USA.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and J. Villanueva Díaz (2002), "Warm season tree growth and precipitation over Mexico", *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, no. D14, pp. 6-1-6-8.
- Villanueva Díaz, J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano Paredes, G. Gutiérrez García, J. Estrada Ávalos and R. Jasso Ibarra (2005), "Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera", *Dendrocronología*, vol. 22, no. 3, pp. 215-223.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano, B. H. Luckman, J. Estrada, D. W. Stahle, I. Sánchez, M. D. Therrell y R. Morán (2006), *Precipitación y flujo histórico de la cuenca Nazas-Aguanaval*, Folleto Científico No. 19, INIFAP CENID-RASPA, Gómez Palacio, Durango.
- Villanueva Díaz, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano Paredes, M. D. Therrell and M. K. Cleaveland (2007), "Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico", *Climatic Change*, vol. 83, pp. 117-131.
- Villanueva Díaz, J., P. Z. Fulé, J. Cerano Paredes, J. Estrada Ávalos e I. Sánchez Cohen (2009), "Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco", *Ciencia Forestal en México*, vol. 34, núm. 105, pp. 37-69.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano, V. Constante, D. W. Stahle, J. Estrada y M. M. Tostado (2011), "Variabilidad hidrolimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Publicación Especial No. 2, pp. 221-234.
- Woodhouse, C. A., D. W. Stahle and J. Villanueva Díaz (2012), "Río Grande and Río Conchos water supply variability over past 500 years", *Climate Research*, vol. 51, no. 2, pp. 147-158.
- Yocom, L. L., P. Z. Fulé, P. M. Brown, J. Cerano, J. Villanueva Díaz, D. A. Falk and E. Cornejo Oviedo (2010), "El Niño Southern Oscillation effect on fire regime in northeastern Mexico has changed over time", *Ecology*, vol. 91, no. 6, pp. 1660-1671.