

Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México

Recibido: 18 de septiembre de 2013. Aceptado en versión final: 20 de diciembre de 2013.

José Villanueva Díaz*
Julián Cerano Paredes*
Lorenzo Vázquez Selem**
David W. Stahle***
Peter Z. Fulé++
Larissa L. Yocom++
Osvaldo Franco Ramos**
José Ariel Ruiz Corral+

Resumen. El bosque de *Pinus hartwegii* constituye el límite superior arbóreo en las montañas de México. En este estudio se desarrolló una red de cronologías de esta especie, localizadas en volcanes del Eje Neovolcánico Transversal, en el centro del país, y picos elevados de la Sierra Madre Oriental, en el noreste. El Análisis de Componentes Principales integró las cronologías en dos grupos, uno para el centro y otro para el noreste, con los que se desarrollaron dos cronologías regionales de 320 años (1690-2009) y 590 años (1420-2009), respectivamente. El fenómeno de El Niño Oscilación

del Sur (ENSO) en su fase cálida (El Niño) y fría (La Niña), mostró un impacto significativo en el comportamiento de la variabilidad hidroclimática descrita por ambas series. La Niña produjo condiciones climáticas contrastantes, es decir, secas en el noreste y húmedas en el centro, mientras que la fase de El Niño originó sequías en ambas regiones, pero solo durante eventos intensos de ENSO.

Palabras clave: Dendrocronología, *Pinus hartwegii*, El Niño, La Niña, sequía.

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

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: lselem@igg.unam.mx; froarc@yahoo.com.mx

*** Tree-Ring Laboratory, Department of Geosciences, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701, EUA. E-mail: dstahle@uark.edu

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

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

Dendrochronological Network of Mountain Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) for dendroclimatic studies in Northeastern and Central Mexico

Abstract. *Pinus hartwegii* is a high elevation species forming the upper treeline in Mexico- from volcanoes of the Transmexican Volcanic Belt in central Mexico and from high elevation peaks of the Sierra Madre Oriental in northeastern Mexico. Pure stands of hartwegii pine have been severely logged in the past affecting the proper functioning of the ecosystem, impacting water yield, biodiversity, and other ecosystem services in detriment of the wellbeing of dense human settlements in the Valley of Mexico. In addition to land-use changes, climate warming may threaten this ecosystem by altering their health, favoring the recruitment over the treeline where is not adapted, and affecting its dynamics, growth rates, and ecological relationships with associated species. Given the dendrochronological potential of hartwegii pine to produce centuries-long time series useful to analyze high and low frequency climate variability, and influence of atmospheric circulatory patterns, the objective of this study was to develop a network of tree-ring chronologies for central and northeastern Mexico, analyze its potential for dendroclimatic reconstructions and to determine the potential impact and teleconnections of atmospheric circulatory patterns. Nine ring-width series of hartwegii pine were developed for the upper conifer forest of some of the main volcanic peaks in the Valley of Mexico and two more series were produced from trees located at the highest peaks in the Sierra Madre Oriental. A Principal Component Analysis of the chronologies defined two eigenvectors with the highest climate variability, the first component integrated several chronologies from central Mexico, e.g., Nevado de Colima, Pico de Orizaba, Iztaccihuatl, and la Malinche, and the second component from northeastern Mexico included Cerro Potosí, N.L. and Cerro La Viga, Coahuila. The chronologies with a common climate response were integrated into representative regional ring-width series, one of them was the chronology for the Transmexican Volcanic Belt with 320 years length (1690-2009), whereas the one for the northeastern region covered the last 590 years (1420-2009). The regional chronology for central Mexico indicated below normal growth (<1.0) as related to droughts for the periods 1698-1702, 1716-1720, 1746-1760, 1806-1813, 1841-1859, 1890-1894, 1935-1940, 1970-1979, and 2000-2004. Similarly, below normal growth for the northeastern ring-width series took place in periods 1450-1460, 1508-1538, 1565-1576, 1661-1673, 1696-1705, 1757-1765, 1784-1790, 1804-1808, 1844-1849, 1866-1894, 1915-1933, and 1998-2003. Wet episodes (>1.0) were common in both representative series for the periods 1726 to 1728, 1753 to 1755, 1791 to 1797,

1831 to 1837, 1895 to 1914, 1923 to 1926, 1940 to 1941, 1957 to 1958, 1965 to 1969, 1985 to 1987, and 2001 to 2005. Verification of some of the detected droughts was done by comparisons with historical records of grain yields, colonial rogation ceremony records, dendroclimatic reconstructions, instrumental climate data, and climatic indices (Palmer Drought Severity Index, Southern Oscillation Index, Tropical Rainfall Index). Contrasting the regional ring-width indices for the common period (1690-2009) did not show a significant association ($r=0.087$, $p<0.05$), however, both regional dendrochronological series responded to dry and wet episodes for particular years and showed opposite conditions (dipole) for some other years (i.e., wet in the center, dry in the north, and vice versa). This finding indicates that the chronologies responded mostly to local or regional climatic conditions but in certain periods may have been impacted by circulatory patterns affecting larger areas in northern and central Mexico. ENSO is the most important phenomena determining climatic differences between regions. In this study, the Niña conditions (cold phase) was characterized by producing dry conditions in the north and wet conditions in central Mexico (periods 1869 to 1874, 1886 to 1887, 1915 to 1917, 1955 to 1956, 1970 to 1975, and 1988 to 1999); however, other Niña events produced droughts in both regions as in years 1892, 1893, 1922, 1942, and 1998; but others did not have any significant impact such, i.e., 1903, 1908-1910, 1924, 1949, 1954, 1964, and 2007. On the other hand, the El Niño (warm phase) produced dry conditions in both regions, but only during intense ENSO events, that is 1880, 1888, 1899, 1905, 1913, 1918, 1929-1930, 1940, 1963, 1970, 1972, 1976, 1983, 1991, and 1997. A comparison between the ring-width indices of the regional chronology representative of the Transmexican Volcanic Belt and a seasonal (January-September) mean precipitation for the region indicated a significant association ($r=0.8$, $p<0.000$) between both variables. It was not found a significant association with temperature. Even though temperature at high elevations may limit physiological processes for the species, precipitation seems to be the most limiting factor for growth. The wide distribution range of hartwegii pine from Mexico to Guatemala provides an excellent opportunity to expand the current network of treeline chronologies to better understand climate variability and impacts of climate change.

Key words: Dendrochronology, *Pinus hartwegii*, El Niño, La Niña, drought.

INTRODUCCIÓN

Los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes en México, particularmente en bosques de coníferas del género *Pinus*, debido a la capacidad de sus especies para producir anillos de crecimiento anual bien definidos (Stahle *et al.*, 2000). Una de las especies de pino que se desarrolla en las partes altas de las montañas de México y Guatemala es el pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl, sinónimo con *Pinus rudis*), que constituye el límite superior arbóreo (*treeline*), a elevaciones de 2 300 a 4 300 m (Beaman, 1962; Lauer, 1978; Matos, 1995; Farjón *et al.*, 1997) y temperaturas medias anuales de 6 a 7° C (Körner y Paulsen, 2004).

El interés de conservar estas masas forestales no solo se relaciona con la producción de biomasa comercial, sino también con los servicios ambientales hidrológicos y de captura de carbono, de los cuales se benefician los grandes asentamientos humanos del centro de México y sin los cuales sería difícil asegurar su permanencia (Vázquez, 2010).

La importancia de desarrollar una red dendrocronológica de *Pinus hartwegii* en México ha sido reconocida por diversos investigadores (Biondi, 2001; Biondi *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2010a; Yocom *et al.*, 2010), debido a su potencial dendroclimático y de reconstrucción de incendios, así como por el posible impacto del calentamiento global en el reclutamiento de especímenes arriba de su límite arbóreo. Los modelos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para diversos escenarios climáticos, sugieren un incremento en la temperatura y una reducción en la precipitación para el norte y centro de México (Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2012), situación que impactaría en primera instancia a especies en su límite de distribución altitudinal, como es el caso de *P. hartwegii* (Ricker *et al.*, 2007). Por lo anterior, los objetivos de este estudio son contrastar los resultados derivados de la red dendrocronológica desarrollada con esta especie en diversas montañas del centro y del noreste de México, analizar su potencial para reconstrucciones dendroclimáticas, y explorar las causas de la variabilidad hidroclimática histórica de esta región, en particular, la influencia del fenómeno

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

MATERIALES Y MÉTODOS

La ubicación de rodales de *Pinus hartwegii* con fines dendrocronológicos se fundamentó en estudios descriptivos de la distribución de la especie (Farjon *et al.*, 1997), comunicación directa y retroalimentación con prestadores de servicios técnicos forestales, pequeños propietarios y en exploraciones directas en campo (Figura 1).

En cada sitio se seleccionaron árboles longevos de *P. hartwegii* y se obtuvieron tres y cuatro incrementos o núcleos de crecimiento por árbol, con un taladro de Pressler de 0.5 mm de diámetro interno y longitudes de 35 a 50 cm; adicionalmente, se colectaron secciones transversales de árboles muertos para facilitar el fechado y lograr extender las cronologías en el tiempo (Figura 2).

Las muestras se fecharon mediante técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976). Cada crecimiento individual (anillo anual) se midió con un sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans, 1980). El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas no relacionadas con clima se removieron con el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1986), al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva. Con ello se genera un Índice de Ancho de Anillo (IAA), es decir, un índice de crecimiento anual estandarizado de cada anillo, para cada muestra. Al promediar los valores estandarizados de crecimiento de todas las muestras de un mismo sitio, se obtiene una cronología estandarizada para dicha localidad (Fritts, 1976). Los IAA generados se graficaron y se les insertó una línea flexible suavizada (“spline”) a nivel de década, para resaltar eventos de baja frecuencia (Cook y Peters, 1981).

Para analizar la respuesta climática común entre cronologías, se realizaron correlaciones simples y

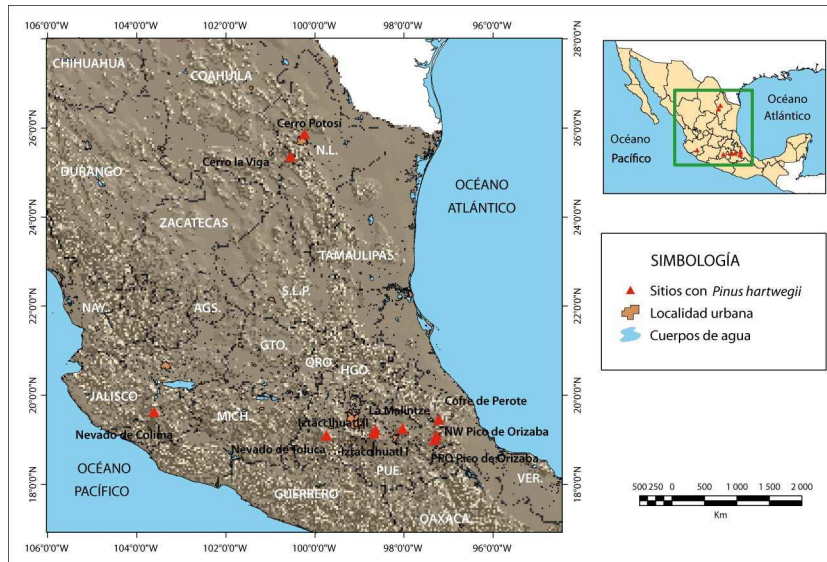


Figura 1. Distribución geográfica de las cronologías de *Pinus hartwegii* en México.



Figura 2. Paraje con árboles longe-vos (más de 400 años) de *Pinus hartwegii* a ~3 900 m de altitud en el Cofre de Perote, Veracruz.

se corrió un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés). Los núcleos de crecimiento de cronologías con una respuesta climática común, se integraron en una sola base de datos de medición, para generar una cronología regional mediante el proceso de estandarización con ARSTAN. Con las series de tiempo regionales, se determinaron similitudes o discrepancias en la variabilidad climática (periodos húmedos o secos) y el impacto de fenómenos de circulación general, como ENSO.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Generación de cronologías regionales

La red dendrocronológica desarrollada estuvo integrada por once cronologías de anillo total, que se generaron en picos elevados de Eje Neovolcánico Transversal (centro de México) y de la Sierra Madre Oriental (noreste de México) en los estados de Nuevo León y Coahuila (Tabla 1).

El análisis de correlación entre cronologías, determinó la existencia de asociaciones significativas entre ellas, particularmente las del noreste de México; algunas ubicadas en el Eje Neovolcánico, como las del Pico de Orizaba y Nevado de Toluca, tuvieron correlaciones positivas y significativas con la mayoría de las cronologías comparadas (Tabla 2).

El PCA determinó la dominancia de dos grupos bien diferenciados, donde el componente "I" integró a las cronologías Nevado de Colima, Jalisco (NEC), NW Pico de Orizaba, Veracruz (PIC), Iztaccíhuatl II, Estado de México (VIZ) y La Malinche, Tlaxcala (MZI), todas del Eje Neovolcánico; mientras que el componente II incluyó a las cronologías Cerro Potosí, Nuevo León (CPO) y Cerro La Viga, Coahuila (VPR), ambas en la Sierra Madre Oriental (Figura 3).

La variabilidad climática común determinada en las series regionales de *P. hartwegii*, como por ejemplo en el noreste de México, se atribuye a que

Tabla 1. Ubicación geográfica de las colectas de *Pinus hartwegii* en México

Nombre del sitio	Fecha de colecta	Clave sitio	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Extensión de la cronología
Iztaccíhuatl I, Estado de México	15/12/2007	IZT	19.157	98.674	3 650-3 950	1756 - 2007
Iztaccíhuatl II, Estado de México	15/04/2009	VIZ	19.225	98.647	3 840-3 930	1690 - 2008
La Malinche, Tlaxcala	23/10/2008	MZI	19.253	98.034	3 645	1851 - 2008
Cofre del Perote, Veracruz	05/05/2006	COF	19.463	97.219	3 905	1582 - 2010
Nevado de Colima, Jalisco	03/10/2008	NEC	19.631	103.612	3 700	1748 - 2007
Nevado de Colima, Jalisco ¹	-----	NDC	19.580	103.620	3 700	1553-1999
Cerro la Viga, Coahuila	19/06/2008	VPR	25.362	100.549	3 570	1620 - 2007
Cerro Potosí, Nuevo León	22/10/2009	CPO	25.875	100.234	3 700	1420 - 2009
NW Pico de Orizaba, Veracruz	10/11/2009	PIC	19.083	97.280	3 750	1750 - 2009
Parque Pico Orizaba, Veracruz	15/04/2010	PPO	19.001	97.318	3 980	1546 - 2009
Nevado de Toluca, México	07/05/2010	NET	19.097	99.739	4 030	1725 - 2009

¹ Cronología de anillo total obtenida del Banco Internacional de Anillos de Árboles (ITRDB, por sus siglas en inglés) y desarrollada por Franco Biondi.

Tabla 2. Correlaciones entre las cronologías de *Pinus hartwegii* en México

Clave	IZT	VIZ	MZI	COF	NEC	NDC	VPR	CPO	PIC	PPO	NET
IZT	1.0	0.115	0.0005	-0.072	0.092	-0.127	-0.048	0.011	-0.241	0.110	-0.241
VIZ	0.115	1.0	0.379	0.029	0.073	0.065	0.160	0.0286	0.340	0.262	0.450
MZI	0.0005	0.379	1.0	-0.053	0.263	0.050	0.290	0.007	0.263	0.22	0.320
COF	-0.071	0.029	-0.053	1.0	0.051	0.073	0.192	0.196	0.242	0.370	0.262
NEC	0.092	0.073	-0.108	0.051	1.0	0.167	0.042	0.245	-0.036	-0.069	0.054
NDC	-0.127	0.065	0.050	0.073	0.167	1.0	-0.132	-0.001	0.240	0.274	0.230
VPR	-0.048	0.16	0.290	0.193	0.042	-0.133	1.0	0.680	0.097	0.081	0.164
CPO	0.011	0.028	0.007	0.195	0.249	-0.002	0.680	1.0	-0.102	0.085	0.093
PIC	-0.241	0.340	0.263	0.242	0.367	0.24	0.097	-0.102	1.0	0.245	0.367
PPO	0.11	0.262	0.219	0.370	-0.069	0.273	0.081	0.085	0.245	1.0	0.180
NET	-0.241	0.450	0.320	0.263	0.054	0.230	0.164	0.093	0.367	0.180	1.0

¹ Los valores en negritas son significativos al menos a un nivel de probabilidad del 95% ($p < 0.05$) para el periodo común 1890-2007 ($n=118$), excepto para el Nevado de Toluca (NDT) que se comparó en el periodo 1890-1997 ($n=108$).

los picos elevados de la Sierra Madre Oriental, posiblemente por su cercanía entre ellos, sean impactados por un mismo fenómeno climático (Villanueva *et al.*, 2007). En contraste, en el Eje Neovolcánico, se observa una variación mayor entre los picos volcánicos, atribuida a diferencias climáti-

cas probablemente provocadas por la orientación de cada sitio, así como por el impacto de fenómenos climáticos distintos en función de su ubicación con respecto a las fuentes de humedad del Golfo de México y del Pacífico (Granados y Reyna, 2012). Con base en lo anterior, se generaron dos

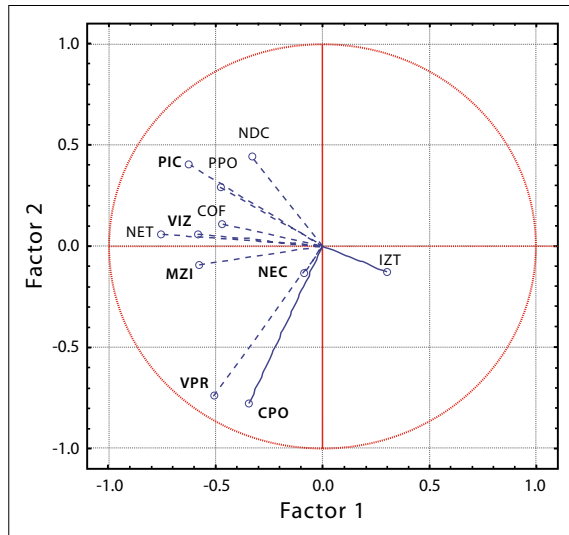


Figura 3. Análisis de PCA que indica variabilidad común entre las cronologías del noreste (VPR y CPO) (Factor 1) y las del centro de México (Factor 2).

cronologías regionales, una para el noreste (Sierra Madre Oriental) y otra para el centro de México (Eje Neovolcánico).

Las cronologías regionales (Figuras 4 y 5) se expresan en valores estandarizados de ancho de anillo, donde valores por encima o por debajo de la media de 1.0 indican, respectivamente, un crecimiento anual superior o inferior al promedio de toda la serie. La cronología regional del Eje Neovolcánico se extiende de 1690 a 2010 (311 años), donde se observan periodos muy marcados con valores por abajo de la media (1.0), los cuales se relacionan con sequías, sobresaliendo los periodos de 1698 a 1702, 1716 a 1720, 1746 a 1760, 1806 a 1813, 1841 a 1859, 1890 a 1894, 1935 a 1940, 1970 a 1979 y 2000 a 2004. Periodos húmedos (aquéllos con valores superiores a la media), se presentaron de 1724 a 1731, 1800 a 1805, 1945 a 1951 y 1985 a 1987 (Figura 4).

La cronología regional del noreste se extiende de 1420 a 2009 (590 años), donde se observan periodos de sequía intensos, como los ocurridos en los periodos de 1450 a 1460, 1508 a 1538, 1565 a 1576, 1661 a 1673, 1696 a 1705, 1757 a 1765, 1784 a 1790, 1804 a 1808, 1844 a 1849, 1866 a 1894, 1915 a 1933 y 1998 a 2003; mien-

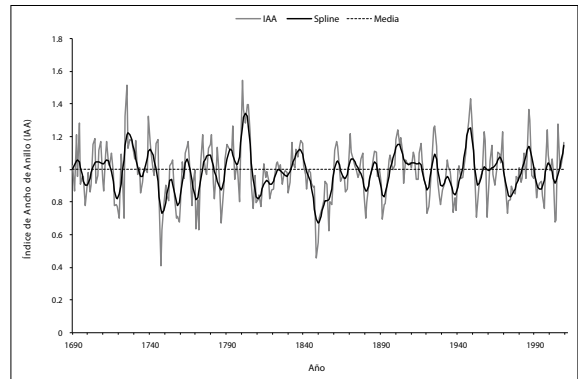


Figura 4. Cronología de anillo total de *P. hartwegii*, representativa de las condiciones climáticas dominantes en sitios elevados del Eje Neovolcánico en el centro de México (Nevado de Colima, Iztaccíhuatl, Malinche, Pico de Orizaba). La línea gris muestra fluctuaciones anuales, la línea negra está suavizada a nivel de década para resaltar los eventos de baja frecuencia.

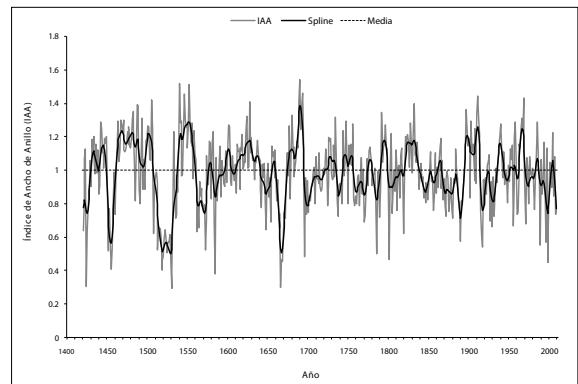


Figura 5. Cronología regional de *P. hartwegii*, representativa de las condiciones climáticas dominantes donde se ubica la especie en el noreste de México (Cerro La Viga, Coahuila y Cerro Potosí, Nuevo León). La línea gris muestra fluctuaciones anuales, la línea negra está suavizada a nivel de década para resaltar los eventos de baja frecuencia.

tras que los periodos húmedos se presentaron de 1463 a 1489, 1500 a 1507, 1539 a 1560, 1610 a 1640, 1674 a 1694, 1751 a 1756, 1821 a 1837, 1895 a 1914, 1934 a 1941 y de 1963 a 1969 (Figura 5).

La verificación de varias de estas sequías históricas ha sido documentada con reconstrucciones dendroclimáticas (Therrell *et al.*, 2006; Stahle *et al.*, 2012), rogativas (Garza, 2002) y producción de granos básicos (Florescano, 1969).

b. Análisis entre series regionales

La comparación de los índices anuales para el periodo común (1690–2009) entre las cronologías regionales, indicó una correlación no significativa ($r = 0.087$, $p > 0.05$). No obstante, para ciertos años o periodos, las condiciones climáticas fueron similares, situación influenciada por fenómenos climáticos de amplio impacto (Figura 6, Tabla 3).

El análisis de los eventos de baja frecuencia para ambas regiones (Figura 7), muestra tendencias similares en ciertos periodos, pero diferentes en otros, lo cual indica que el comportamiento de las cronologías en términos climáticos depende de condiciones específicas locales, pero en ciertos periodos patrones atmosféricos de circulación general parecieran impactar ambas regiones en forma diferente, con mayor precipitación en una región

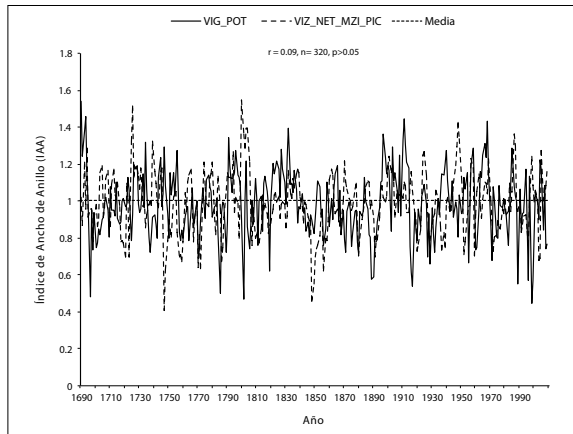


Figura 6. Comparación de la variabilidad anual entre los índices de la cronología regional del noreste (VIG_POT) y del centro de México (VIZ_NET_MZI_PIC) para el periodo común 1690-2009.

Tabla 3. Periodos en los que la cronología regional del noreste y del Eje Neovolcánico indicaron condiciones climáticas similares o discrepantes

Condición de humedad			
Periodos secos comunes	Periodos húmedos comunes	Sequía en el NE, húmedo en Eje Neovolcánico	Húmedo en el NE, sequía en Eje Neovolcánico
1695-1702	1726-1728	1703-1704	1691
1757-1762	1753-1755	1711-1713	1693
1785-1788	1791-1797	1724-1725	1718-1719
1806-1808	1831-1837	1729-1731	1723
1842-1850	1895-1914	1737-1742	1734-1735
1854-1857	1923-1926	1763-1765	1746-1752
1879-1883	1940-1941	1774-1775	1756
1890-1894	1957-1958	1789-1790	1776-1778
1918-1922	1965-1969	1804-1805	1809-1817
1927-1932	1985-1987	1838-1840	1826-1831
1988-1926	2001, 2005	1869-1874	1836-1839
-	-	1877-1878	1851-1854
-	-	1886-1887	1863-1865
-	-	1915-1917	1972-1973
-	-	1946-1948	2004
-	-	1950-1951	-
-	-	1961-1962	-
-	-	1998-1999	-
-	-	2006-2009	-

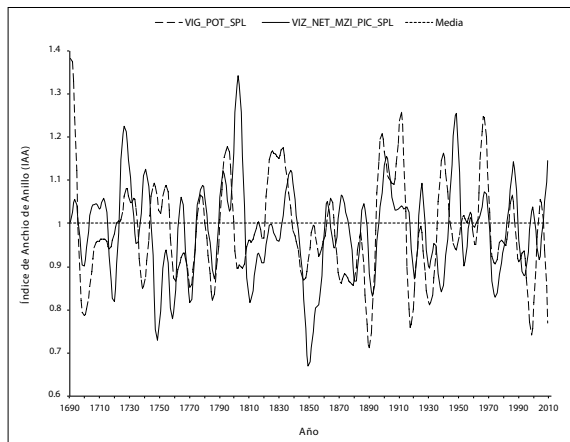


Figura 7. Comparación de eventos de baja frecuencia para el periodo común (1690-2009), entre la cronología del noreste (VIG_POT) y la del centro de México (VIZ_NET_MZI_PIC).

y sequía en la otra (Magaña *et al.*, 1999; Stahle *et al.*, 2012).

El fenómeno de ENSO en su fase fría (La Niña), que se caracteriza por un decremento igual o mayor de -0.5°C en la temperatura media del mar en el Pacífico Tropical, en general corresponde con un incremento de la precipitación en el Eje Neovolcánico, en comparación con la región noreste, donde se presentan condiciones de sequía, como ocurrió en los años de fase fría (La Niña) para los periodos 1869 a 1974, 1886 a 1887, 1915 a 1917, 1955 a 1956, 1970 a 1975 y 1998 a 1999 (Tabla 3); no obstante, en otros eventos de fase fría se presentaron sequías en ambas regiones, como en 1892, 1893, 1922, 1942 y 1988; y en algunos otros casos (1903, 1908-1910, 1924, 1949, 1954, 1964, 2007) esta condición no tuvo impacto aparente (Tabla 3).

En relación con la fase cálida (El Niño), caracterizada por aumentos de 0.5°C o más de la temperatura media del mar en la región del Pacífico Tropical, su efecto es producir condiciones de sequía en el centro y sur de México, debido a un movimiento de la Zona Intertropical de Convergencia hacia el Ecuador (Waliser y Gautier, 1993). Los eventos ENSO durante la fase El Niño fueron muy variables en el Eje Neovolcánico Transversal. Así, durante el periodo 1868 a 2010 se produjeron sequías en los años 1880, 1888, 1899, 1905, 1913,

1918, 1929-1930, 1940, 1963, 1970, 1972, 1976, 1983, 1991 y 1997 (McPhaden *et al.*, 2006, Yocom y Fulé, 2012).

c. Asociación entre la cronología regional y la precipitación reconstruida

Una comparación de la cronología del Eje Neovolcánico con una reconstrucción de precipitación estacional enero-septiembre realizada para la región de La Malinche con especímenes de *P. hartwegii* ubicados en un rango altitudinal de 3 600 a 3 800 m (Villanueva *et al.*, 2010b), mostró una correlación altamente significativa ($r = 0.82$, $p < 0.001$, $n = 119$, 1890-2008), situación que indica que esta cronología tiene alto potencial para explicar la precipitación acumulada invierno-primavera-verano, que representa más del 85% de la precipitación anual en esta región (Figura 8).

Este resultado confirma el potencial que tiene *P. hartwegii* para desarrollar reconstrucciones de la precipitación pluvial de siglos anteriores al XIX en esta región de México.

CONCLUSIONES

En este estudio se generó una red dendrocronológica de once series de *Pinus hartwegii* y, con base en un análisis de PCA, se seleccionaron aquellas series

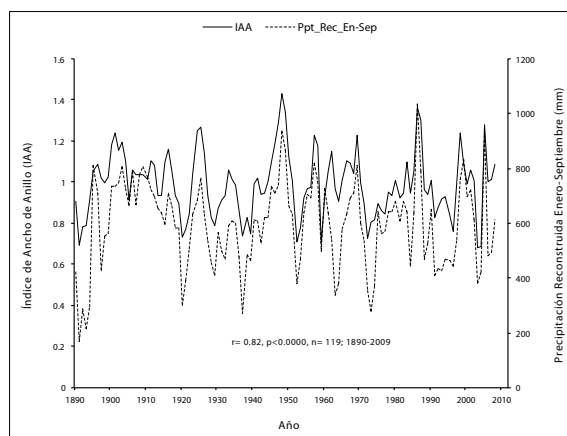


Figura 8. Asociación entre los índices de la cronología regional del Eje Neovolcánico, centro de México (IAA) y una reconstrucción de precipitación estacional enero-septiembre para La Malinche (PptRec_Ene-Sep) $r = 0.82$, $p < 0.0000$.

de tiempo con una respuesta climática común, por lo que se desarrollaron dos series regionales de índices de anillo total, una de 311 y otra de 590 años, representativas de las condiciones climáticas del Eje Neovolcánico y del noreste de México, respectivamente. Estos archivos climáticos permiten comparar sobre una base común la variabilidad del clima, en particular la precipitación, entre el noreste y el centro de México a lo largo de varios siglos; es decir, más allá del periodo de los registros meteorológicos instrumentales.

La comparación de las dos cronologías muestra que ENSO en su fase fría “La Niña” provoca condiciones húmedas en el centro de México y condiciones secas en el noreste del país (Stahle *et al.*, 2012), como ha sucedido en los últimos años (2010-2011), donde una sequía ha dominado la parte norte y condiciones húmedas en parte del centro y sur de México (Monitor de la Sequía América del Norte, 2013). La fase cálida de ENSO “El Niño” tuvo un efecto menos definido y provocó sequías en ambas regiones, pero solo cuando se presentaron eventos catalogados de alta intensidad.

El desarrollo de estas cronologías regionales es fundamental para mejorar el entendimiento de las relaciones climáticas de fenómenos circulatorios que impactan el norte y centro de México. Por otro lado, el calentamiento global probablemente constituye una amenaza para la permanencia de *Pinus hartwegii* (Ricker *et al.*, 2007). El entendimiento de este fenómeno permitirá implementar estrategias con miras a la conservación de estos ecosistemas, de importancia en la generación de servicios ambientales hidrológicos, captura de carbono, recreación, calidad del paisaje y belleza escénica de los ecosistemas forestales de alta montaña de México, entre otros bienes y servicios, que son esenciales para la supervivencia de una megalópolis como la ciudad de México y otras zonas densamente pobladas del centro de México.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado con fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN # 2047, a su vez

financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325); así mismo se contó con apoyo del proyecto con fondos fiscales INIFAP “Cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo agrícola, forrajero y forestal en México”; y del proyecto PAPIIT-UNAM clave IN105213.

REFERENCIAS

- Beaman, J. H. (1962), “The timberlines of Iztaccíhuatl and Popocatepetl, Mexico”. *Ecology*, vol. 43, no. 3, pp. 337-385.
- Biondi, F. (2001), “A 400-year tree-ring chronology from the tropical treeline of North America”, *Ambio*, vol. 30, no. 2, pp. 162-166.
- Biondi, F., P. Hartsough and I. G. Galindo Estrada (2009), “Recent warming at the tropical treeline of North America”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 7, no. 9, pp. 463-464.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes (1986), *Guide for computer program ARSTAN*, Laboratory of Tree Ring Research, The University of Arizona, Tucson, AZ.
- 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. 47, pp. 37-59.
- Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa and B. T. Styles (1997), *A field guide to the pines of Mexico and Central America*, Kew Publishing, Royal Botanical Garden, Oxford.
- Florescano, E. (1969), *Precios del maíz y crisis agrícolas en México*, El Colegio de México, México.
- Fritts, H. C. (1976), *Tree rings and climate*. Academic Press, New York.
- Garza Merodio, G. G. (2002), “Frecuencia y duración de sequías en la Cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 48, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp.106-115.
- Granados, R. y T. Reyna (2012), *Centro-Occidente de México: variación climática e impactos en la producción agrícola*, Geografía para el siglo XXI, Serie Libros de investigación, núm. 9, Instituto de Geografía, UNAM, 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.

- Körner, C. and J. Paulsen (2004), "A world-wide study of high altitude treeline temperatures", *Journal of Biogeography*, vol. 31, pp. 713-732.
- Lauer, W. (1978), "Timberline studies in Central Mexico", *Arctic and Alpine Research*, vol. 10, no. 2, pp. 383-396.
- Magaña, V., J. L. Pérez, L. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez (1999), "El Niño y el clima", en Magaña, V. (ed.), *Los impactos del Niño en México*, SEP-CONACYT, México, pp. 23-68.
- Matos, J. A. (1995), "*Pinus hartwegii* and *P. rudis*: A critical assessment", *Systematic Botany*, vol. 20, pp. 6-21.
- McPhaden, M. J., S. E. Zebiak and M. H. Glantz (2006), "ENSO as integrating concept in Earth science", *Science*, vol. 314, no. 5806, pp. 1740-1745.
- Monitor de la Sequía de América del Norte (2013), "Animación de mapas", CONAGUA, México.
- Ricker, M., G. Gutiérrez García and D. C. Daly (2007), "Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico", *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 37, pp. 977-989.
- Robinson, W. J. and R. Evans (1980), "A microcomputer-based tree-ring measuring system", *Tree-Ring Bulletin*, vol. 40, pp. 59-64.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara, C. Lie, E. Cook and D. 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., J. Villanueva Díaz, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, G. J. Paull, B. T. Burns, W. Salinas, H. Suzan and P. Z. Fulé (2000), "Recent tree-ring research in Mexico", in Roig, F. A. (comp.), *Dendrocronología en América Latina*, Editorial de la Universidad Nacional del Cuyo (EDIUNC), Mendoza, Argentina, pp. 285-306.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva Díaz, R. R. Heim Jr, F. K. Fye, J. Cerano Paredes, R. Acuña Soto and M. K. Cleaveland (2012), "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*, The University of Chicago, Chicago.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva Díaz, E. Cornejo Oviedo and M. K. Cleaveland (2006), "Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001", *Climatic Change*, vol. 74, no. 4, pp. 493-504.
- Vázquez Medrano, G. (2010), *Estudio de la factibilidad para un mercado local de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca Valle de Bravo-Amanalco*, tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales, Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- 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*, no. 83, pp. 117-131.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano Paredes, D. W. Stahle, V. Constante García, L. Vázquez Selem, J. Estrada Ávalos y J. D. Benavides Solorio (2010a), "Árboles longevos de México", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 1, núm. 2, pp. 1-23.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano Paredes, J. Estrada Ávalos, V. Guerra De La Cruz, D. W. Stahle, V. Constante García, P. Ruiz, G. Cardoza Martínez y O. Palacios Villa (2010b), "Análisis de la variabilidad hidroclimática en el estado de Tlaxcala", en Estrada Ávalos, J., R. Trucios C., J. Villanueva D., M. Rivera G. y L. F. Flores Lui (eds.), *Manejo sustentable de los recursos naturales en el Río Zahuapan, Tlaxcala, México*, INIFAP CENID RASPA, Gómez Palacio, Durango, México, pp. 137-156.
- Waliser, D. E. and C. Gautier (1993), "A satellite-derived climatology of the ITCZ", *Journal of Climate*, vol. 6, no. 11, pp. 2162-2174.
- Yocom, L. L., P. Z. Fulé, P. M. Brown, J. Cerano Paredes, 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. 9, no. 16, pp. 660-1671.
- Yocom, L. L. and P. Z. Fulé (2012), "Human and climate influence on frequent fires in a high-elevation tropical forest", *Journal of Applied Ecology*, vol. 49, no. 6, pp. 1356-1364.