

Evidencia de erupciones volcánicas en anillos de árboles en bosques de México

Evidence of volcanic eruptions in tree rings in forests of Mexico

Julián Cerano-Paredes¹, Aldo R. Martínez-Sifuentes¹, Hilario Macías-Rodríguez¹, Jesús A. Muñoz-Villalobos¹, José A. Urrieta-Velázquez¹

¹ INIFAP CENID-RASPA. Km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor para correspondencia: cerano.julian@gmail.com

RESUMEN

Los anillos de los árboles se han utilizado con éxito durante casi un siglo para reconstruir la variabilidad climática pasada antes de la era instrumental. El impacto climático de los eventos volcánicos más grandes se ha evaluado en numerosos estudios de modelado y reconstrucciones de temperatura con base en anillos de árboles. El impacto de las erupciones volcánicas de latitudes altas o bajas en el clima no es bien conocido en varias regiones tropicales como México. El presente estudio tiene como objetivo principal, con base en un registro de anillos de *Pinus hartwegii* Lindl. obtenido en el volcán Cofre de Perote, mostrar evidencia del impacto de las erupciones de alta o baja latitud en el clima de México durante los últimos 550 años. Con base en técnicas dendrocronológicas se dataron los crecimientos anuales. Se realizó una revisión de las principales erupciones volcánicas. Finalmente, estos últimos registros, se relacionaron con la cronología de anillos de crecimiento de *P. hartwegii* para determinar los efectos de dichas erupciones en esta región geográfica del centro del país. Durante los últimos 578 años (1436-2013), se determinó una clara señal de que la cronología de árboles muestra evidencia sincrónica de disminución en crecimiento inducido por importantes erupciones volcánicas. Sobresale el efecto de cuatro de ellas, Huaynaputina, Cotopaxi, Tambora y Novarupta, estos eventos registraron un efecto negativo en el crecimiento, una disminución importante del ancho de anillo anual (formación de microanillos), lo que sugiere condiciones climáticas adversas en esta región del país. Mejorar este conocimiento en futuros estudios con análisis más detallados, permitiría realizar un mejor análisis regional y global de los efectos climáticos asociados con grandes erupciones.

Palabras clave: Crecimiento anual, Cofre de Perote, dendrocronología, disminución de temperatura, microanillos.

ABSTRACT

Tree rings have been used successfully for nearly a century to reconstruct past climate variability before the instrumental age. The climatic impact of larger volcanic events has been assessed in numerous modeling studies and temperature reconstructions based on tree rings. The impact of high and low latitude volcanic eruptions on climate is not well known in several tropical regions such as Mexico. The main objective of this study is, based on a record of rings of *Pinus hartwegii* Lindl. obtained at the Cofre de Perote volcano, show evidence of the impact of high or low latitude eruptions on the climate of Mexico during the last 550 years. Based on dendrochronological techniques, the annual growths were dated. A review of the main volcanic eruptions was carried out. Finally, these last records were related to the chronology of *P. hartwegii* growth rings to determine the effects of these eruptions in this geographical region of the center of the country. During the last 578 years (1436-2013), a clear signal was determined that the tree chronology shows synchronous evidence of growth decline induced by major volcanic eruptions. The effect of four of them stands out, Huaynaputina, Cotopaxi, Tambora and Novarupta, these events registered a negative effect on growth, a significant decrease in the width of the annual ring (formation of microrings), which suggests adverse climatic

conditions in this region of the country. Improving this knowledge in future studies with more detailed analyzes would allow a better regional and global analysis of the climatic effects associated with large eruptions.

Keywords: Annual growth, Cofre de Perote, dendrochronology, temperature decrease, microrings.

INTRODUCCIÓN

Grandes erupciones volcánicas han causado importantes fluctuaciones climáticas en el pasado, especialmente cuando la nube volcánica inyectada en la atmósfera es químicamente rica en gases de azufre y experimenta una dispersión global en la estratosfera por los vientos, afectando la radiación de onda corta y de onda larga (Robock, 2000; Sigl *et al.*, 2015). La reconstrucción de su impacto en el paleoclima es esencial para mejorar los modelos climáticos que permiten evaluar los efectos agrícolas, socioeconómicos, demográficos y políticos de futuras erupciones (Stoffel *et al.*, 2015).

Se han utilizado varios parámetros de anillos de árboles para estudiar eventos volcánicos pasados de sitios sensibles a la temperatura en el límite de la línea de árboles. Uno de ellos es el ancho del anillo, el incremento anual de los árboles. Los árboles generalmente responden al enfriamiento forzado volcánicamente produciendo anillo estrechos (microanillos) o anillos faltantes (Anchukaitis *et al.*, 2012).

El impacto de las erupciones de latitudes altas o bajas en el clima no es bien conocido en varias regiones tropicales como México. Mejorar este conocimiento permitiría realizar un mejor análisis regional y global de los efectos climáticos asociados con grandes erupciones (Scuderi, 1990). En México, estudios previos se han centrado en los vínculos entre las sequías extremas, las condiciones de frío y la crisis agrícola y social (hambrunas y epidemias) de los últimos milenios, utilizando la dendrochronología y las fuentes históricas (Therrell *et al.*, 2005, Cerano-Paredes *et al.*, 2011).

Dado lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo principal, con base en un registro de anillos de árboles extenso y de alta resolución derivado de *P. hartwegii* obtenido en el volcán Cofre de Perote, mostrar evidencia del impacto de las erupciones de alta o baja latitud en el clima en México durante los últimos 550 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Parque Nacional Cofre de Perote se localiza entre las coordenadas geográficas 19°25'33" a 19°33'52" de latitud norte y 97°06'55" a 97°12'52" de longitud oeste. Está delimitado por la cota de los 3000 msnm hasta su máxima elevación que alcanza los 4250 msnm, ubicándola como la séptima montaña más alta de México. Forma parte del sistema volcánico Citlaltépetl-Cofre de Perote, en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano.

Este volcán constituye un lugar de gran importancia ecológica, económica y social para la región central de Veracruz. Por tal razón fue decretado como "Parque Nacional" una medida para conservar los bosques que lo cubren, ya que esta vegetación es la que determina el equilibrio entre los diversos factores naturales que intervienen en la climatología e hidrología de la región (DOF, 1937).

Métodos de campo

El muestreo dendrocronológico se realizó en un gradiente altitudinal de 3000 a los 4000 m. Se tomaron muestras de árboles vivos empleando taladros de Pressler (**Figura 1a, b y c**) y secciones transversales de árboles muertos (árboles tiradas y tocones) con el apoyo de motosierra (**Figura 1d**). Las muestras se etiquetaron con información específica del árbol, del sitio y su ubicación geográfica.



Figura 1. a) Indica la toma de muestras (virutas) de árboles vivos empleando taladro de Pressler de diferentes diámetros (5 y 12 mm) y longitudes, esto último para alcanzar el centro del árbol, b y c) extracción de la muestra y d) obtención de secciones transversales de árboles muertos con el apoyo de una motosierra.

Métodos de laboratorio

Las muestras se prepararon en el laboratorio para su análisis, se montaron en molduras de madera para dar mayor firmeza y resistencia a los núcleos de crecimiento durante el proceso de pulido y fechado. Las secciones transversales rotas se pegaron, aquellas que presentaron cierto grado de pudrición, además de pegarse se montaron en piezas de madera (triplay) y se adhirieron con una grapadora mecánica para mayor firmeza. Ambas muestras se pulieron con diferentes grados de lijas (de 120 a 1200 para virutas y 40 a 1200 para secciones) para resaltar las estructuras de crecimiento anual (Figura 2a) y facilitar el análisis bajo microscopio (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).



Figura 2. a) Muestra los anillos de crecimiento posterior al proceso de pulido, b y c) indican el sistema de medición Velmex y la forma en que se realiza la medición del ancho de los crecimientos anuales.

Cada uno de los anillos de crecimiento fue fechado al año exacto de formación mediante la técnica dendrocronológica estándar denominada “fechado cruzado” (crossdating, en inglés), principio de la dendrocronología que permite determinar el año exacto de formación de cada anillo con base en la similitud de los patrones de crecimiento (Stokes y Smiley, 1996).

Una vez fechadas las muestras, cada anillo anual de crecimiento se midió individualmente empleando un sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 mm (Figura 2c). Este sistema está conectado a una computadora que utiliza el programa Measure J2X versión 4.2 para registrar las mediciones de ancho de anillo (Figura 2b) (Robinson y Evans, 1980).

Análisis de datos

El fechado y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, el cual inserta la curva de mejor ajuste al crecimiento de cada árbol y luego divide el valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva (Cook y Holmes, 1984). Se genera una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987; Fritts, 2001). Este procedimiento se repitió para cada una de las diferentes muestras de los árboles y finalmente el promedio de todas las series estandarizadas permitió generar la cronología para el área de estudio.

Erupciones volcánicas

Se realizó una revisión minuciosa de literatura sobre las erupciones volcánicas históricas más relevantes, para las cuales, se ha documentado explosiones a gran escala con importantes fluctuaciones climáticas en el pasado. Los registros históricos se relacionaron con la cronología de anillos de crecimiento de *P. hartwegii* del volcán Cofre de Perote, para determinar los efectos de dichas erupciones en esta región geográfica de México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los anillos de los árboles son un proxy importante para reconstruir la variabilidad climática y los efectos ambientales ocasionados por diversos fenómenos como las erupciones volcánicas. Para entender el efecto de importantes erupciones volcánicas en la

climatología regional del centro de México, se empleó una cronología de índice de anillo que comprende cerca de los últimos seis siglos.

Registros de erupciones volcánicas

Se logró copilar una base de datos de 26 registros de erupciones volcánicas durante el periodo 1452-1991, eventos con una distribución geográfica al rededor del mundo. De estos eventos sobresalen 16 erupciones por su magnitud, siendo 11 de ellos (1452, 1600, 1698, 1783, 1812, 1813, 1815, 1883, 1902, 1912 y 1991) categorizados como fuertes erupciones y cinco (1754, 1877, 1887, 1963-1964 y 1982) como erupciones pequeñas (Figura 3).

Cronología de índice de anillo

Para el centro de México, se logró datar al año exacto los anillos anuales de un total de 157 núcleos de crecimiento de *P. hartwegii*. Se generó una cronología de índice de anillo total de 578 años, que comprende el periodo de 1436-2013 (Figura 3). La

cronología permitió analizar la variabilidad climática regional de los últimos cinco siglos y medio. La extensión de la cronología está determinada por la edad de los árboles, a medida que los individuos son más longevos, es factible el desarrollo de series más extensas que permiten analizar la variabilidad climática y fenómenos naturales en una escala mayor de tiempo.

Durante los últimos cinco siglos y medio, existe una clara señal de que la cronología de árboles muestra evidencia sincrónica de disminución en crecimiento inducido por importantes erupciones volcánicas (Figura 3). De las 16 erupciones más importantes, sobresale el efecto de cuatro de ellas, Huaynaputina, Cotopaxi, Tambora y Novarupta, figuras b, c, d y e, respectivamente. Años posteriores a cada uno de estos eventos se registra un efecto negativo en el crecimiento, una disminución del ancho de anillo importante, lo que sugiere condiciones climáticas adversas en esta región del país.

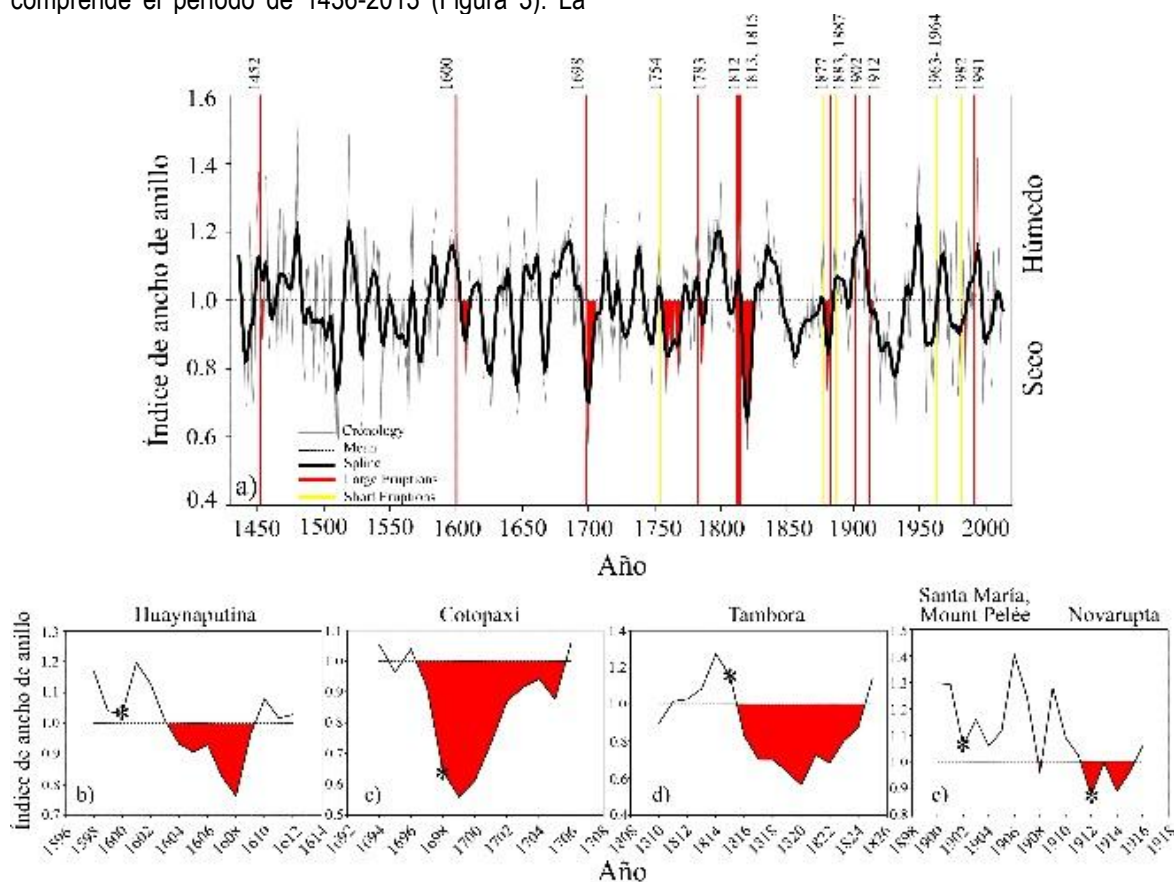


Figura 3. Efecto de las erupciones volcánicas en el clima regional. a) Índice de anillo de *P. hartwegii* para el volcán Cofre de Perote, Veracruz, México. Esta serie muestra la variabilidad climática regional de los últimos 578 años y los efectos en el clima como consecuencia de importantes erupciones volcánicas. Las figuras inferiores b, c, d y e) muestran la disminución en crecimiento varios años posterior a las erupciones.

En escalas de tiempo interanuales a decenales, el enfriamiento forzado por erupciones volcánicas es una fuente clave de variabilidad de temperatura (Robock y Oppenheimer, 2003) y puede registrarse en los anillos de árboles durante el último milenio o en algunos casos incluso antes (D'Arrigo *et al.*, 2001; Hegerl *et al.*, 2003; Salzer y Hughes, 2007). Se han utilizado varios parámetros de anillos de árboles para estudiar eventos volcánicos pasados de sitios sensibles a la temperatura en el límite de la línea de árboles. Uno de ellos es el ancho del anillo, los incrementos anuales de los árboles. Los árboles generalmente responden al enfriamiento forzado por volcanes y a otros eventos adversos produciendo anillo estrechos, muy delgados (microanillos) o anillos faltantes (a veces localmente ausentes) (Frank *et al.*, 2007; Anchukaitis *et al.*, 2012).

Para el Parque Nacional Cofre de Perote en el centro de México, destaca la evidencia de cuatro fuertes erupciones volcánicas en los últimos 550 años; una a inicio del siglo XVII (1600), otra a finales del siglo XVII (1698), una más a mediados de la segunda década del siglo XIX (1815) y la última a inicio de la segunda década del siglo XX (1912). Cada una de estas cuatro erupciones sincroniza con importantes disminuciones de crecimiento anual en los árboles para esta región del centro del país.

Generalmente, los estudios se han centrado en los vínculos entre las sequías extremas, las condiciones de frío y la crisis agrícola y social (hambunas y epidemias) de los últimos milenios, utilizando la dendrocronología y las fuentes históricas (Therrell, 2005; Cerano-Paredes *et al.*, 2011). Sin embargo, varios de estos eventos han sido propiciados por importantes erupciones volcánicas con efectos a escala global. Por ejemplo, una gran sequía reconstruida, acompañada de heladas no estacionales, ocurrió entre 1785 y 1787, siendo conocida como El Año del Hambre. Este clima frío y extremadamente seco se ha asociado con la erupción de Laki (Therrell, 2005). Además, otro evento pronunciado de sequía / heladas no estables conocido como "Año del conejo" tuvo lugar en 1454, relacionado con la gran erupción volcánica en Kuwea (1453) (Therrell, 2005).

De acuerdo con Stoffel *et al.* (2015), siete de los diez años más fríos en el hemisferio norte detectados en los anillos de los árboles, que incluyen las erupciones de Samalas y Tambora, coinciden con las principales erupciones de sulfato reconocidas en los registros de núcleos de hielo. Se ha estimado una disminución de

la temperatura de alrededor de 0.8° a 1.3° C durante los dos años posteriores a la erupción de Samalas y Tambora (Stoffel *et al.*, 2015). Además, se sugirió un enfriamiento significativo en los mismos años (erupciones del hemisferio norte) o años después (ambos hemisferios) provocado por erupciones de volcanes relevantes como Huaynaputina, Tambora y Krakatau, principalmente en América del Norte y Europa. De estos tres últimos eventos, dos (Huaynaputina, Tambora), han tenido efectos negativos en el clima de México, estas dos erupciones ha propiciado dos de las disminuciones más importantes en crecimiento de los árboles relacionadas con períodos de enfriamiento importante (Figura 3).

El impacto de las erupciones de latitudes altas o bajas en el clima no es bien conocido en regiones tropicales como México (Scuderi, 1990). Sin embargo, este primer análisis demuestra que, fenómenos naturales en años específicos o periodos cortos de tiempo como las erupciones volcánicas, han afectado regiones geográficas extensas alcanzando regiones tropicales como nuestro país, y que con base en las series paleoclimáticas, es factible conocer sus alcances e impactos a diferentes escalas geográficas.

CONCLUSIONES

Los estudios del efecto de las erupciones en la variabilidad del clima de regiones tropicales como México, son nulos, esto atribuido a que se tiene la idea de que, a estas latitudes no se tiene un impacto en el clima. Este primer análisis evidencia el efecto en disminución en el crecimiento anual de los árboles que se desarrollan a 4000 msnm, donde la temperatura juega un papel importante en su desarrollo. Más de 10 erupciones se han relacionado con efectos negativos y cuatro de ellas con consecuencias significativas en el clima del centro de México durante los pasados 550 años. Mejorar este conocimiento y profundizar con análisis más detallados en estudios futuros, permitiría realizar un mejor análisis regional y global de los efectos climáticos asociados con grandes erupciones.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento por parte del proyecto "Estudio de la



Relación Clima-Incendios en el Norte-Centro de México" financiado por SEP-CONACYT.

LITERATURA CITADA

- Anchukaitis, K.J., Breitenmoser, P., Briffa, K.R., Buchwal, A., Buntgen, U., Cook, E.R., D'Arrigo, R.D., Esper, J., Evans, M.N., Frank, D., Grudd, H., Gunnarson, B.E., Hughes, M.K., Kirdyanov, A.V., Körner, C., Krusic, P.J., Luckman, B., Melvin, T.M., Salzer, M.W., Shashkin, A.V., Timmer, C., Vaganov, E.A., and Wilson, R.J.S. (2012). Tree rings and volcanic cooling, *Nature Geosci.*, vol. 5, pp. 836–837. doi.org/10.1038/ngeo1645
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-González, J. and Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE2), 235-249.
- Cerano-Paredes, J., Szejner, P., Gutiérrez-García, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Arellano, J. R., Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., and Castruita-Esparza, L. U. (2022). How to Extract Climate Variability from Tree-Rings. *J. Vis. Exp*, 181, e63414. doi:10.3791/63414
- Cook, E.R. (1987). The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies. *Tree-Ring Bulletin*. 47, 37-59.
- D'arrigo, R., Frank, D., Jacoby, G. and Pederson, N. (2001). Spatial response to major volcanic events in or about AD 536, 934 and 1258: frost rings and other dendrochronological evidence from Mongolia and northern Siberia: comment on RB Stothers, 'Volcanic dry fogs, climate cooling, and plague pandemics in Europe and the Middle East' (Climatic Change, 42, 1999). *Climatic Change*, 49(1), 239-246.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), 1937. Decreto que declara Parque Nacional el Cofre de Perote.
- Frank, D., Buntgen, U., Böhm, R., Maugeri, M., and Esper, J. (2007). Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quaternary Science Reviews*, 26(25-28), 3298-3310. doi:10.1016/j.quascirev.2007.08.002
- Fritts, H.C. (2001). *Tree rings and climate*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press.
- Hegerl, G. C., Crowley, T. J., Baum, S. K., Kim, K. Y. and Hyde, W. T. (2003). Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemispheric temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(5). doi:10.1029/2002GL016635
- Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69–75.
- Robinson, W. J., Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40, 59–64.
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate, *Rev. Geophys.*, vol. 38, no. 2, pp. 191–219.
- Robock, A. and Oppenheimer, C. (2003). Volcanism and the Earth's Atmosphere.
- Salzer, M. W. and Hughes, M. K. (2007). Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. *Quaternary Research*, 67(1), 57-68. doi:10.1016/j.yqres.2006.07.004
- Scuderi, L. A. (1990). Tree-ring evidence for climatically effective volcanic eruptions. *Quaternary Research*, 34(1), 67-85.
- Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J.R., Welten, K.C., Plunkett, G., Ludlow, F., Buntgen, U., Caffee, M., Chellman, N., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Kipfstuhl, S., Kostick, C., Maselli, O.J., Mekhaldi, F., Mulvaney, R., Muscheler, R., Pasteris, D.R., Pilcher, J.R., Salzer, M., Schüpbach, S., Steffensen, J.P., Vinther, B.M., and Woodruff, T.E. (2015). Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2500 years, *Nature*, vol. 523, pp. 543–549. doi:10.1038/nature14565
- Stoffel, M., Khodri, M., Corona, C., Guillet, S., Poulain, V., Bekki, S., Guiot, J., Luckman, B.H., Oppenheimer, C., Lebas, N., Beniston, M. and Masson-Delmotte, V. (2015). Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience*, 8(10), 784-788. doi: 10.1038/NGeo2526
- Stokes, M. A., Smiley, T. L. (1996). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago, 73 p.



Therrell, M. D. (2005). Tree rings and 'El año del hambre' in Mexico. *Dendrochronologia*, 22(3), 203-207. doi:10.1016/j.dendro.2005.04.006