

Sensibilidad del crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* a variables climáticas en el occidente del estado de Chihuahua, México

Sensitivity of radial growth of *Pseudotsuga menziesii* to climatic variables in the west of the state of Chihuahua, Mexico

Julián Cerano-Paredes^{1*}, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes¹, Rosalinda Cervantes Martínez²,

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

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. C.P. 25315. Saltillo, Coahuila, México

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

RESUMEN

Ante la falta de registros climáticos observados extensos, los anillos de los árboles juegan un papel relevante en la reconstrucción de variables climáticas en escalas de siglos o milenios. El presente trabajo de investigación tiene por objetivo evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento total de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb). Franco. Para evaluar las relaciones entre los datos climáticos y los datos estandarizados del ancho de los anillos de los árboles, se calcularon funciones de respuesta, análisis de correlación de Pearson (r). Además, se calculó un análisis de correlación móvil utilizando una ventana de 40 años con una compensación de 1 año y una ventana de registros meteorológicos de 18 meses. Se detectó que las precipitaciones de noviembre a mayo influyeron positivamente en el crecimiento, mientras que la temperatura máxima invierno-primavera afectó negativamente su desarrollo. Además, la respuesta climática de *P. menziesii* no ha variado a lo largo del tiempo. En un escenario de cambio climático derivado de la actividad humana, con menos lluvias y mayores temperaturas, se espera que *P. menziesii* se vea afectada en su crecimiento de manera negativa y sea susceptible a brotes de insectos o eventos de incendios.

Palabras clave: Crecimiento anual, Madera Chihuahua, dendrocronología, precipitación, temperatura.

ABSTRACT

In the absence of extensive observed climate records, tree rings play a relevant role in the reconstruction of climate variables on scales of centuries or millennia. The objective of this research work is to evaluate the influence of climatic variables on the total growth of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb). Franco. To evaluate the relationships between climate data and standardized tree ring width data, response functions, Pearson correlation analysis (r), were calculated. Additionally, a rolling correlation analysis was calculated using a 40-year window with a 1-year offset and an 18-month weather record window. It was detected that rainfall from November to May positively influenced growth, while the maximum winter-spring temperature negatively affected its development. Furthermore, the climatic response of *P. menziesii* has not varied over time. In a climate change scenario derived from human activity, with less rainfall and higher temperatures, *P. menziesii* is expected to be negatively affected in its growth and be susceptible to insect outbreaks or fire events.

Keywords: Annual growth, Madera Chihuahua, dendrochronology, precipitation, temperature.

INTRODUCCIÓN



El cambio climático probablemente aumentará los eventos de lluvias extremas que pueden promover las tasas de crecimiento de los árboles en regiones donde la precipitación es un factor limitante (Carlón-Allende et al., 2018). Sin embargo, también se espera que aumente el riesgo de sequías que podrían causar daños importantes, como una disminución en el crecimiento de los árboles debido al estrés hídrico, un aumento del riesgo de incendios forestales y un aumento de los brotes de insectos y enfermedades debido a una reducción en la capacidad de los árboles para producir savia (Ryan et al., 2008).

Por lo tanto, el crecimiento de los árboles podría ser un bioindicador útil proporcionando información sobre la sostenibilidad del bosque, así como conocimiento de las variaciones climáticas naturales históricas (Fritts, 1976). A través de los anillos de crecimiento de muchas especies de árboles, es posible reconstruir una variedad de eventos ambientales pasados que directa o indirectamente han limitado su desarrollo como la temperatura, las precipitaciones, los brotes de insectos y los incendios, por nombrar sólo algunas aplicaciones (Swetnam y Brown, 2010). En presencia de un cambio climático antropogénico y en ausencia de registros meteorológicos extensos, los estudios dendrocronológicos en áreas boscosas han adquirido mayor relevancia en las últimas décadas debido a los datos de alta resolución que se pueden obtener de los anillos de los árboles, lo que podría permitir a los científicos determinar eventos climáticos extremos y conocer sus posibles impactos tanto en la dinámica de los ecosistemas como en la sociedad (Speer, 2009).

En la región de la Sierra Madre Occidental (SMO) es posible localizar rodales aislados y dispersos de *P. menziesii* (Cruz-Maldonado, 2010). Esta especie tienen la característica de ser muy longeva (más de 400 años), periodo en el que sus anillos de crecimiento registran las condiciones climáticas predominantes durante su desarrollo, eventos extremos de incendios, brotes de insectos y enfermedades (Villanueva-Díaz et al., 2008). Con esta información es posible conocer la variabilidad climática histórica, estudiar los posibles impactos que podría sufrir el ecosistema ante la presencia de diferentes escenarios de cambio climático y determinar la disponibilidad de servicios ecosistémicos en esta zona de la SMO.

Los objetivos de este estudio fueron: (1) desarrollar cronologías de anillos de árboles para *P. menziesii*,

(2) evaluar la influencia de las variables climáticas en el crecimiento total de *P. menziesii* y (3) examinar posibles cambios en el régimen climático a través de datos instrumentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área del Santuario de la Cotorra Serrana (29° 19' 25" N, 108° 12' 49" W) se localizan en el municipio de Madera, Chihuahua, en un gradiente de elevación de 2,500 a 3,000 msnm. Se ubica en la cuenca del Río Yaqui, que a su vez pertenece a la Región Hidrológica 9 Sonora Sur, con una superficie de 72,859.05 km² y un perímetro de 2,333.03 km, dentro de la SMO (INEGI, 2019). Asimismo, el sitio pertenece a Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) de México. El Santuario de la Cotorra Serrana forma parte del RTP-34 conocida como Babicora (CONABIO, 2019).

Métodos de campo

Con base en recorridos de campo se seleccionó el sitio El Santuario de la Cotorra Serrana, un bosque mixto con presencia de ejemplares de *P. menziesii*, *P. arizonica* y *P. strobiformis*.

Se identificaron los individuos con las características adecuadas para el desarrollo de estudios dendroclimáticos tales como: árboles lo más longevos posibles (caracterizados por un fuste o ramas en forma espiral, corteza delgada, copa reducida con ramas gruesas colgantes) y que hayan sufrido el menor disturbio posible (incendios, terremotos, animales silvestres o la acción del ser humano), de forma que maximice la señal de la variable climática buscada. El sistema de muestreo empleado para la toma de muestras fue selectivo. Se tomaron muestras de árboles vivos empleando taladros de Pressler (Figura 1). Las muestras se etiquetaron con información específica del árbol, del sitio y su ubicación geográfica.





Figura 1. Extracción de un núcleo de crecimiento o viruta con el apoyo de un taladro de Pressler de 12 mm de diámetro.

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 (Figura 2). Las 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 2) y facilitar el análisis bajo microscopio (Cerano-Paredes et al., 2022).



Figura 2. Muestras pulidas que permiten observar los patrones de crecimiento de diferentes árboles de *P. menziesii*. La variación de los anillos de crecimiento se debe a la influencia del clima regional.

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. Este sistema está conectado a una computadora que utiliza el programa Measure J2X versión 4.2 para registrar las mediciones de ancho de anillo (Robinson y Evans, 1980).

Análisis de datos

La datación 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.

Los datos meteorológicos de las temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales se obtuvieron de diez estaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cercanas al área de estudio. Para la precipitación mensual, se emplearon los datos de los cuadrantes “51934” y “53212”, que incluyen parte de las estaciones climáticas ubicadas al oeste del estado de Chihuahua y al este del estado de Sonora (Terán-Cuevas et al., 2010). Debido a que muchas de estas estaciones meteorológicas tienen datos faltantes en algunos meses o años, éstos se estimaron promediando los registros recopilados de otras estaciones cercanas. De esa manera, se generó una serie regional anual y mensual de temperaturas y precipitaciones para el periodo 1957-2015 (59 años) la cual se utilizó para analizar la influencia entre estas variables climáticas y el crecimiento anual de *P. menziesii*.

Para evaluar la relación entre los datos climáticos y los datos estandarizados de ancho de anillo de *P. menziesii*, se realizaron análisis de correlación de Pearson (r) durante el periodo común 1957-2015 utilizando el paquete Treeclim (Zang y Biondi, 2014) del software estadístico R versión 3.6.1 (R Development Core Team, 2019). Este paquete evaluó los intervalos de confianza y la significancia estadística ($P < 0.05$) de los coeficientes de correlación. Además, se realizó un análisis de correlación móvil utilizando una ventana de 40 años, con un año de compensación y con una ventana de

18 meses de registros meteorológicos, comenzando desde el mes de julio del año anterior hasta diciembre del año actual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el sitio El Santuario, 34 núcleos de crecimiento de 16 árboles de *P. menziesii* fueron fechados al año exacto de su formación. Las muestras que no se pudieron datar fueron porque presentaban daños en su estructura o periodos de supresión que dificultaron un fechado confiable. Las series de ancho de anillo de *P. menziesii* mostraron una correlación estadísticamente significativa de 0.60 ($P < 0.01$). La cronología del ancho de anillo de *P. menziesii* presentó una longitud de 156 años (1863-2018), una edad media de los árboles de 100 años y una señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés) de 0.92 con más de 10 muestras desde el año 1874.

Las series de ancho de anillo supera el parámetro de correlación determinado por el COFECHA (0.3281, $P < 0.01$) (Holmes, 1983), indicando de esta manera que la especie posee una buena sensibilidad a los cambios ambientales y que tienen potencial para la reconstrucción de la variabilidad climática del lugar.

Relación clima-crecimiento

El análisis de correlación (período 1957-2015) mostró asociaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre la serie de *P. menziesii* y la precipitación desde octubre del año anterior hasta mayo del año actual ($r > 0.30$; Figura 3A), mientras que la temperatura máxima mensual promedio presentó correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) de agosto a noviembre del año previo y desde enero hasta junio del año actual ($r < -0.24$; Figura 3B). Con respecto a la temperatura media mensual promedio, se encontraron asociaciones negativas significativas ($P < 0.05$) en los meses de enero, marzo, abril y junio del año en curso ($r < -0.28$; Figura 3C). En contraste, la temperatura mínima mensual promedio únicamente presentó una correlación positiva significativa ($P < 0.05$) en agosto del presente año ($r = 0.25$; Figura 3D).

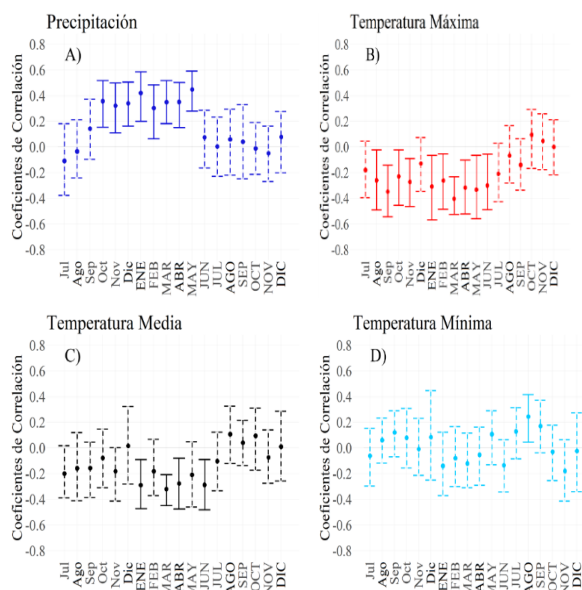


Figura 3. Análisis de correlación entre la cronología de ancho de anillo de *P. menziesii* y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio. Las líneas sólidas indican meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$). Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

El análisis de la relación clima-crecimiento indica una correlación positiva con la precipitación invierno-primavera (desde noviembre del año anterior hasta mayo del año actual). Los resultados anteriores sugieren que, la precipitación es la variable más importantes en el crecimiento anual de *P. menziesii*. Una explicación de los resultados obtenidos sería que las lluvias invernales suelen ser de baja intensidad, favoreciendo una mayor infiltración y saturación del suelo. Además, la baja evapotranspiración que existe en esos meses ayuda a que el suelo se sature de agua, dejándola disponible para la próxima temporada de crecimiento (Fritts, 1976). En cuanto a la temperatura máxima mensual promedio, el análisis de la relación clima-crecimiento identifica una correlación negativa durante los meses invierno-primavera. La respuesta negativa a esta variable se debe a que temperaturas más cálidas aceleran la evapotranspiración, produciendo estrés en el árbol debido a una mayor pérdida de agua (Cook y Cole, 1991). Además, al aumentar el déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés), el árbol reacciona cerrando los

estomas para evitar una pérdida excesiva de agua, afectando de esta manera su propio crecimiento (Leverenz, 1981).

Se han reportado resultados similares en varios estudios en lugares cercanos (Cleaveland et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2015; Chávez-Gándara et al., 2017) y en otras partes de México (Cerano-Paredes et al., 2013; Astudillo-Sánchez et al., 2017; Carlón-Allende et al., 2021).

Estabilidad temporal de la respuesta del crecimiento a variables climáticas

Las funciones de correlación móvil mostraron una estabilidad temporal sin cambios estacionales importantes en la respuesta de crecimiento de *P. menziesii*. Se encontraron asociaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre la serie de ancho de anillo y la precipitación desde septiembre del año anterior hasta enero del año actual y desde marzo a mayo del año en curso ($r > 0.25$; Figura 4A). Con respecto a la temperatura máxima mensual promedio, se identificaron correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) particularmente en los meses de agosto, septiembre, noviembre y diciembre del año anterior y desde enero hasta junio del año actual ($r < -0.26$; Figura 4B). Además, la temperatura media mensual promedio también presentó correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) en enero y de marzo a junio del año en curso ($r < -0.25$; Figura 4C). En contraste, se pudo apreciar que la temperatura mínima mensual promedio únicamente influyó positivamente ($P < 0.05$) en el índice de ancho de anillo durante el mes de agosto del año actual ($r > 0.26$; Figura 4D).

P. menziesii no registra un cambio en la estabilidad temporal. En cuanto a las temperaturas máximas y medias, ambas variables impactan negativamente en su crecimiento. Los resultados del análisis de correlación móvil muestran que *P. menziesii* no ha presentado variaciones durante prácticamente todo el período analizado. Se observaron asociaciones negativas significativas de agosto del año anterior a junio del año actual para temperaturas máximas y de enero a junio del año en curso para temperaturas medias durante prácticamente todo el período analizado.

Ante los escenarios de cambio climático, esta sensibilidad de *P. menziesii* podría tener un mayor impacto en su desarrollo. Es importante señalar que *P. menziesii* tiene una categoría de protección bajo la

Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

Aun cuando el análisis de correlación móvil no ha reflejado cambios en la respuesta de crecimiento de *P. menziesii*, esto no significa que no pueda suceder en un futuro cercano debido al cambio climático. Una alteración en los patrones de precipitación y un aumento en las temperaturas podrían tener un impacto significativo en el crecimiento de la especie. Las proyecciones de los modelos climáticos desarrollados por el IPCC (2014) en el Quinto Informe de Evaluación señalan una reducción de las precipitaciones, un aumento de las temperaturas y una mayor ocurrencia de eventos extremos como sequías para la región occidental del estado de Chihuahua. Tales cambios en las variables climáticas eventualmente afectarán de manera negativa la respuesta de crecimiento de *P. menziesii* en el futuro. Menos precipitaciones y temperaturas más altas conducirán a una menor densidad de árboles y a mayores tasas de evapotranspiración, lo que a su vez reducirá el contenido de agua del suelo (Babst et al., 2019). Además, un aumento en el VPD provocará una disminución en el crecimiento y en la fortaleza del árbol debido a una reducción en la fotosíntesis (Novick et al., 2016).

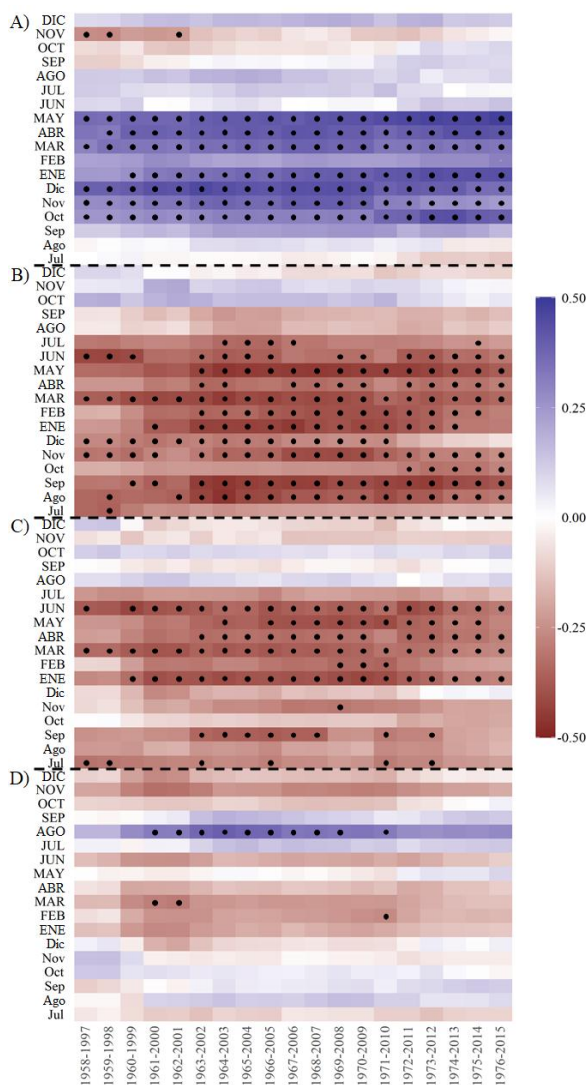


Figura 4. Funciones de correlación móvil relacionando el crecimiento de anillo de *P. menziesii* con la precipitación (A), temperatura máxima promedio (B), temperatura media promedio (C) y temperatura mínima promedio (D), desde el mes de julio del año anterior hasta diciembre del año actual (18 meses). Correlaciones significativas ($P < 0.05$) están señaladas por puntos negros. Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

En consecuencia, los árboles no saludables serán más susceptibles a brotes de insectos y enfermedades, provocando una mayor mortalidad y un impacto importante para la población debido a la pérdida de servicios ambientales significativos (IPCC, 2014). Cervantes-Martínez et al. (2019) registraron brotes de escarabajos descortezadores (*Dendroctonus* spp.) en México, Guatemala y

Honduras, observando que estos eventos han ocurrido en años con precipitaciones por debajo del promedio y que su ocurrencia ha aumentado desde 1970. Con lo anterior, se prevé que el crecimiento de *P. menziesii* se vea afectado en los próximos años.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento por parte del proyecto “Procesos de mitigación del impacto por cambio climático en la agricultura del sur de Sonora”, con clave 1450034669.

LITERATURA CITADA

- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. and Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31, 441–453. DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. and Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1). DOI: 10.1126/sciadv.aat4313
- Carlón-Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Mendoza, M. E. and Pérez-Salicrup, D. R. (2018). Climatic signal in earlywood and latewood in conifer forests in the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Tree-Ring Research*, 74(1), 63–75. DOI: 10.3959/1536-1098-74.1.63
- Carlón-Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Soto-Castro, G., Mendoza, M. E. and Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106920
- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R. and Rubio-Camacho, E. A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y*



- del ambiente, 19(3) 413-423. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2013.02.007
- 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
- Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J. and Castruita-Esparza, L. U. (2019). Historical bark beetle outbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1985-2015) and their relationship with droughts. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 25(2), 269-290. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2019.01.006.
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R. and Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. DOI: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J. and Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climate Change*, 59, 369–388. DOI: 10.1023/A:1024835630188
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2019). Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad.
- Cook, E.R. (1987). The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies. *Tree-Ring Bulletin*. 47, 37-59.
- Cook, E. R. and Cole, J. (1991). On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change. *Climatic Change* 19, 271–282. DOI: 10.1007/BF00140166
- Cruz-Maldonado, N. 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 maestría. Escuela de Postgrado CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. ISBN 0-12-268450-8
- Fritts, H.C. (2001). *Tree rings and climate*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra, Suiza.
- Holmes, R. L., 1983. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69–75.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*.
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: diurnal variation. *Canadian Journal of Botany*, 59(3), 349-356. DOI: 10.1139/b81-048
- Novick, K. A., Ficklin, D. L., Stoy, P. C., Williams, C. A., Bohrer, G., Oishi, A. C., Papuga, S. A., Blanken, P. D., Noormets, A., Sulman, B. N., Scott, R. L., Wang, L. and Phillips, R. P. (2016). The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 6, 1023–1027. DOI: 10.1038/nclimate3114
- Robinson, W. J. and Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40, 59–64.
- Ryan, M., Archer, S., Birdsey, R., Dahm, C., Heath, L., Hicke, J., Hollinger, D., Huxman, T., Okin, G., Oren, R., Randerson, J. and Schlesinger, W. (2008). *Land Resources*. En: U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research (eds.). *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity*. Washington, D.C., USA.
- Speer, J. H. (2009). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. DOI: 10.1002/gea.20357



- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. (1996). An Introduction to Tree-Ring Dating. University of Chicago Press, Chicago, 73 p.
- Swetnam, T. and Brown, P. (2010). Comparing selected fire regime condition class (FRCC) and LANDFIRE vegetation model results with tree-ring data. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 1-13. DOI: 10.1071/WF08001
- Terán-Cuevas, A. R., Gutiérrez-Castillo, M. E. and Davydova-Belitskaya, V. (2010). Escenarios de lluvia en México. Ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Estrada-Ávalos, J. and Constante-García, V. (2008). Potencial Dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y Reconstrucciones de Precipitación y Flujo en México. Gómez Palacio, México. ISBN 978-607-425-002-2
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés-Montaña, C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L. L. and Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, 87, 141–153. DOI: 10.14350/rig.44485
- Zang, C. and Biondi, F. (2014). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38, 431–436 (ver. V). DOI: 10.1111/ecog.0133