

Estudios dendrohidrológicos en México

Dendrohydrological studies in Mexico

Aldo Rafael Martínez-Sifuentes^{1*}

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Margen Derecho Canal del Sacramento km. 6.5, Zona Industrial 4ª Etapa, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor para correspondencia: im_aldo09@hotmail.com

RESUMEN

Los estudios dendrohidrológicos permiten conocer la variabilidad a largo plazo de los volúmenes de escurrimiento de una cuenca o río, lo cual, ayuda a exacerbar el conocimiento en vías de contribuir a un manejo integral del recurso hídrico. En México, se han desarrollado muy pocas reconstrucciones de escurrimientos, limitándose a solo a seis, en donde el norte de México es donde se han generado cinco de ellas, en cuencas de importancia económica y ambiental, tales como la cuenca del río Nazas, río Mayo, río Conchos y río Piaxtla. Para el centro de México, solamente se ha desarrollado una reconstrucción, la cual fue para la Región hidrológica 16 Armería-Coahuayana, al sur del estado de Jalisco. Las más extensas fueron las del río Nazas, principalmente la de la cuenca alta con estimaciones desde el año 1210 al 2011, generada con anillos de crecimiento anual de *Taxodium mucronatum* Ten. Este tipo de estudios, si bien, coadyuvan para el entendimiento histórico del comportamiento de los volúmenes de escurrimiento, se ven limitados por diversos factores, de entre los cuales destaca el número escaso de estaciones hidrométricas y la calidad de los registros observados que sirven como predictantes en los modelos.

Palabras clave: El Niño Oscilación del Sur, hidrología, reconstrucción, sequía, variabilidad.

ABSTRACT

Dendrohydrological studies allow us to understand the long-term variability of runoff volumes in a basin or river, which contributes to increase knowledge in support of an integrated management of water resources. In Mexico, very scarce runoff reconstructions have been developed, being limited to only six, where five of them have been generated in the north of Mexico, in basins of economic and environmental importance, such as the Nazas, Mayo, Conchos and Piaxtla river basins. For central Mexico, only one reconstruction has been developed, which was for Hydrological Region 16 Armería-Coahuayana, in the south of the state of Jalisco. The most large were those of the Nazas River, mainly the upper basin with estimates from 1210 to 2011, generated with annual tree-rings of *Taxodium mucronatum* Ten. Although these types of studies contribute to the historical understanding of the behavior of runoff volumes, they are limited by several factors, among which the scarce number of hydrometric stations and the quality of the observed records that serve as predictors in the models stand out.

Keywords: El Niño Southern Oscillation, hydrology, reconstruction, drought, variability.

INTRODUCCIÓN

La dendrohidrología se encarga del estudio de los fenómenos hidrológicos del pasado a largo plazo, con base en reconstrucciones hidroclimáticas del crecimiento anual de los árboles. La ciencia de la dendrohidrología demanda una comprensión integral de las relaciones entre las variables hidrológicas de interés primario (por ejemplo, precipitación, escurrimiento, temperatura, evapotranspiración, agua subterránea y humedad del suelo), así como la respuesta biológica de los árboles a las condiciones ambientales afectadas por esas variables. La respuesta biológica de los árboles se registra en la anchura de los anillos de los árboles. Los estudios dendrohidrológicos requieren un conocimiento de diversos aspectos y componentes de los sistemas naturales y biológicos de las especies que sirven como proxies, como lo es (i) la interacción entre los árboles y las condiciones hidrológicas circundantes reflejadas por el equilibrio de las precipitaciones, las aguas subterráneas y superficiales, la evapotranspiración y otros flujos hidrológicos y (ii) de las condiciones ecológicas y su efecto en la respuesta biológica de los árboles. Las condiciones ecológicas que afectan a los árboles, son: la fertilidad del suelo, la competencia entre plantas, el desarrollo de la masa forestal, enfermedades y plagas, incidencia de los incendios forestales, la contaminación ambiental, y la disponibilidad de luz solar, son de las principales variables relacionados con las condiciones hidrológicas superficiales y sub superficiales. Otro ejemplo de las relaciones existentes hidrológico-ecológicas que afectan al crecimiento de los árboles, son las precipitaciones excesivas, precursoras de las inundaciones y de la erosión del suelo asociada a ellas, ya que pueden ser responsables de la eliminación de los nutrientes del suelo y por consiguiente de la disminución de la tasa de crecimiento de los árboles. Por lo tanto, se sugiere que condiciones hidrológicas totalmente

diferentes (secas y húmedas), cuando se combinan con las condiciones ecológicas, pueden afectar a la respuesta biológica de los árboles, estampada en la anchura de los anillos de los árboles (Loaiciga *et al.*, 1993). El valor de los registros hidrológicos a largo plazo es de gran importancia para la evaluación de los recursos hídricos, así como para la comprensión científica en el comportamiento hidrológico y la circulación de la humedad atmosférica en grandes regiones, y en la predicción de las respuestas hidroclimáticas a las tendencias del cambio climático (Coulthard y Smith, 2016; Chen y Yuan, 2016; Chen *et al.*, 2016; Ferrero *et al.*, 2015). Por lo tanto, este artículo de revisión es un estudio de la ciencia de la dendrohidrología y sus contribuciones a la comprensión de la variabilidad hidrológica a largo plazo en diversas cuencas hidrológicas en México.

Las reconstrucciones dendroclimáticas, particularmente las hidrológicas en el occidente de México, son muy limitadas (Villanueva *et al.*, 2012; Cerano *et al.*, 2013), no obstante, muestran el potencial del desarrollo de series extensas que pueden coadyuvar a entender la variabilidad interanual y multianual de los escurrimientos superficiales, así como la influencia de modos circulatorios que impactan la disponibilidad de recursos hídricos para fines productivos y de consumo humano (Villanueva *et al.*, 2017).

Actualmente, solo existe una reconstrucción de escurrimientos para el centro de México, la cual fue desarrollada para la región hidrológica Armería-Coahuayana, que se localiza al sur del estado de Jalisco (Figura 1). La producción de agua en la porción sur-suroeste del estado de Jalisco permite la subsistencia de los asentamientos humanos localizados en el área limítrofe de los estados de Jalisco, Colima y Michoacán, los cuales dependen del agua producida en regiones hidrológicas como la de Armería-Coahuayana.

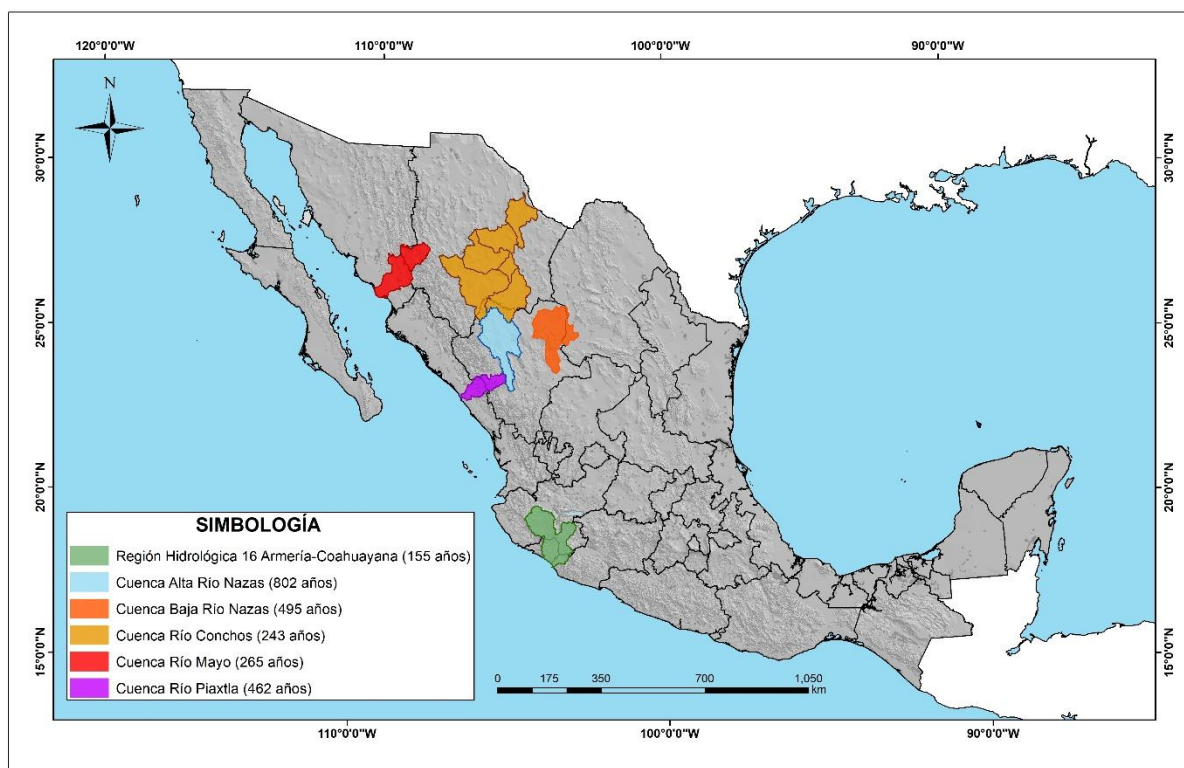


Figura 1. Ubicación geográfica de las cuencas con reconstrucción hidrológica en México.

La reconstrucción de escurrimientos estacional (enero-junio) de la subregión hidrológica Coahuayana alcanzó una extensión de 1860 a 2014 (155 años), la cual se generó con especies de *Pinus douglasiana* Martínez (Pdou), *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (Pooc), *Pinus devoniana* Lindl. (Pdev), *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald (Plum), *Pinus durangensis* Martínez (Pdur) y *Pinus maximinoi* H. E. Moore (Pmax) (Villanueva-Díaz *et al.*, 2021). La presente reconstrucción fundamentada en los anillos anuales de crecimiento de las especies arbóreas con base a técnicas de fechado, presentó eventos de sequías prolongadas que tuvieron lugar de 1861-1867, 1869-1876, 1903-1906, 1932-1937, 1949-1953 y 1988-1991; por otro lado, los eventos húmedos se encontraron en 1888-1890, 1910-1916, 1980-1981, 1983-1984, 1992-1994 y 2012-2014. Se encontró una asociación significativa con el fenómeno el Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés); con correlaciones de hasta -0.47 ($p <$

0.01) considerando el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés) índice perteneciente al grupo de ENSO. De igual manera, se encontró una fuerte asociación con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) ($r = 0.38$, $p < 0.01$). Dichas asociaciones evidencian la fuerte influencia de ambos modos de circulación que determinan los escurrimientos en la subregión hidrológica Coahuayana al sur del estado de Jalisco.

La región del norte de México es caracterizada por la dominancia de condiciones semiáridas y está siendo afectada por una sequía extraordinaria, la más severa, en los registros climáticos observados de los últimos 70 años. Sin embargo, reconstrucciones paleoclimáticas para la misma región indican que en el último milenio han ocurrido sequías más prolongadas y de mayor severidad que la sequía actual (Villanueva *et al.*, 2009).

Entre las entidades de Durango y Sinaloa se localiza el río Piaxtla (Figura 1), el cual es el

segundo más importante de la costa de Sinaloa (Frias-Espéricueta *et al.*, 2014). El río Piaxtla es de suma importancia debido a los diferentes servicios ambientales hidrológicos que proporciona a los estados colindantes. Villanueva-Díaz *et al.*, (2020), desarrolló una reconstrucción de volumen estacional (noviembre-agosto) con una extensión de 1552 a 2013 (462 años) utilizando anillos de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. En la reconstrucción de volúmenes de escurrimiento, se identificaron diversos episodios catalogados como extremadamente secos, sin embargo, los más prolongados fueron los periodos 1754-1755, 1789-1790, 1819-1820, 1866-1868, 1892-1894, 1989-1990 y 2011-2013; en cambio los periodos extremadamente húmedos fueron 1738-1739, 1745-1746, 1814-1816 y 2004-2005. La relación existente entre los volúmenes reconstruidos y los índices ENSO resultó significativa, tanto para el SOI ($r = -0.62$, $p < 0.01$) y el Índice Multivariado de ENSO (MEI, por sus siglas en inglés; $r = 0.51$, $p < 0.01$), dicho lo anterior, se corrobora la fuerte teleconexión de éste modo de circulación global con las condiciones húmedas que predominan el área del río Piaxtla, principalmente con la estación primavera-verano (González-Elizondo *et al.*, 2005).

Se ha desarrollado una reconstrucción de escurrimientos en la región de la cuenca del río Mayo en el estado de Sonora (Figura 1), con una extensión de 1750 a 2014 (265 años) con anillos de crecimiento de *Pinus arizonica* (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020a). Área geográfica de la Serra Madre Occidental con una alta influencia de diversos modos de circulación, que determinan la variabilidad hidroclimática de la región noroeste de México (Magaña *et al.*, 1999). En la reconstrucción estacional de volúmenes de escurrimientos (octubre-mayo), se detectaron a través de un análisis de severidad hidrológica ocho eventos catalogados como intensos 1752-1755, 1772-1776, 1840-1843, 1891-1894, 1909-1912, 1953-1957, 1959-1965 y 2011-2014, y uno como extraordinario 1757-1768. Los eventos

húmedos significativos se encontraron en 1769, 1796, 1816 y 1992. La influencia del fenómeno ENSO se corroboró con una correlación con el SOI de (-0.42 , $p < 0.01$) y análisis de densidad espectral y de coherencia de ondeleta.

La cuenca del río Conchos en el estado de Chihuahua (Figura 1), es una de las cuencas hidrológicas más importantes del norte de México, su principal tributario es el río Conchos, el cual contribuye al tratado binacional entre México y Estados Unidos con 432 Mm³ anuales (CILA, 2008). Se desarrolló una reconstrucción de volúmenes de escurrimiento estacional del río Conchos desde 1775 a 2017 (243 años) (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020b). Mediante un análisis de severidad hidrológica, se detectaron siete eventos intensamente secos que también se registraron en la reconstrucción del río Mayo 1801-1806, 1808-1814, 1859-1864, 1890-1896, 1936-1936, 2006-2009 y 2011-2014 y uno extraordinario 1948-1957, el cual presentó impactos sociales y económicos que han sido documentados para el estado de Chihuahua (Endfield y Fernández, 2006). La influencia del ENSO en la variabilidad hidroclimática se corroboró con correlaciones significativas de SOI y MEI ($r = -0.52$ y 0.32), respectivamente.

En el estado de Durango se han desarrollado dos reconstrucciones de flujo hidrológico estacional, para las cuencas alta y baja del Río Nazas (Figura 1) (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010; Villanueva-Díaz *et al.*, 2014), siendo la generada en la parte alta de la cuenca la más extensa, que va de 1210 a 2011 (802 años) desarrollada con anillos anuales de *Taxodium mucronatum* Ten., en comparación a la de la cuenca baja que es de 1510 a 2004 (495 años). Para la reconstrucción de volumen de escurrimiento estacional de la cuenca alta se encontraron sequías prolongadas en las décadas de 1250, 1320-1340, 1370-1380, 1440-1450, 1460-1470, 1650-1660, 1710-1730, 1790-1810, 1920-1940, 1970-1980 y 1990. Así como escurrimientos extraordinarios en los años 1212, 1229, 1242, 1245, 1271, 1313, 1404, 1427, 1451, 1504, 1520, 1563, 1566, 1620, 1671, 1681, 1735, 1816, 1833, 1869, 1920,

1956, 1959 y 1992, en donde dichos años, parecen estar ligados a la presencia del ENSO, corroborado a través de frecuencias significativas de 8 y 100 años generados por un análisis de densidad espectral (Stahle *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

Las reconstrucciones de escurrimientos en México aún son muy escasas, lo cual limita el conocimiento en la variabilidad hidrológica de más cuencas importantes productoras de agua. Los factores que pudieran considerarse como limitantes en estos estudios, son el factor de recurso económico para generar los muestreos dendrocronológicos, así como calidad y cantidad de información alojada en estaciones hidrométricas representativas que trabajen como predictante en los modelos de transferencia. El norte de México es una zona con alta influencia de modos de circulación general, como lo es el ENSO, por lo tanto, es necesario incrementar los estudios evocados a conocer aún más el comportamiento hidrológico de dichos fenómenos, a través de sus teleconexiones con otros fenómenos que expliquen la variabilidad de escurrimientos en México.

LITERATURA CITADA

- Cerano P., Méndez J., Amaro A., Villanueva J., Cervantes R. y Rubio E. 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biósfera de Manantlán, Jalisco. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 19(3): 413-423. <https://doi.org/10.45154/rchscfa.2013.02.007>
- Chen F., Yuan J., Zhang R.b., Wang Q., Shang M., Zhang W. y Fan A. 2016. Shiyang River streamflow since AD 1765, reconstructed by tree rings, contains far-reaching hydro-climatic signals over and beyond the mid-latitude Asian continent. Hydrological Processes 30(13): 2211-2222. <https://doi.org/10.1002/hyp.10788>
- Chen, F. y Yuan J. 2016. Streamflow reconstruction for the Guxiang River, eastern Tien Shan (China): linkages to the surrounding rivers of Central Asia. Environmental Earth Sciences 75(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5849-1>
- CILA. 2008 Informe anual 2008. Cd. Juárez, Chihuahua, México. <http://www.cila.gob.mx/publicaciones/2008.pdf>.
- Coulthard B. y Smith J. 2016. A 477-year dendrohydrological assessment of drought severity for Tsable River, Vancouver Island, British Columbia, Canada. Hydrological Processes 30(11): 1676-1690. <https://doi.org/10.1002/hyp.10726>
- Endfield H. y Fernández-Tejeda I. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial chihuahua. Climate Change 75:391-419. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-3492-7>
- Ferrero E., Villalba R., De Membiela M., Hidalgo F. y Luckman H. 2015. Tree-ring based reconstruction of Rio Bermejo streamflow in subtropical South America. Journal of Hydrology 525: 572-584. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.004>
- González-Elizondo M., Jurado E., Návar J., González-Elizondo S., Villanueva J., Aguirre O. y Jiménez J. 2005. Tree-rings and climate relationships for *Douglas- fir* chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681–2001 rain reconstruction. Forest Ecology and Management 213(1): 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.012>



- Loaiciga HA., Haston L. y Michaelsen J. 1993. Dendrohydrology and long-term hydrologic phenomena. *Reviews of Geophysics* 32(2): 151-171
- Magaña V., Pérez J., Conde C., Gay C. y Medina S. 1999. El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México. General Meteorology Department, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 36.
- Martínez-Sifuentes A., Villanueva-Díaz J. y Estrada-Ávalos J. 2020a. Runoff reconstruction and climatic influence with tree rings, in the Mayo river basin, Sonora, Mexico. *iForest* 13: 98-106. <https://doi.org/10.3832/for3190-013>
- Martínez-Sifuentes A., Villanueva-Díaz J., Carlon-Allende T., Estrada-Ávalos J. 2020b. 243 years of reconstructed streamflow volume and identification of extreme hydroclimatic events in the Conchos River Basin, Chihuahua, Mexico. *Trees* 34: 1347-1361. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02002-w>
- Stahle D., Villanueva-Díaz J., Burnette J., Cerano-Paredes J., Heim Jr R., Fye K., Acuña-Soto R., Therrell M., Cleaveland K, y Stahle D. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters* 38, L05703:1-4.
- Villanueva-Díaz J., Cerano J., Benavides J., Stahle D., Estrada J., Constante V. y Tostado M. 2012. Reconstrucción de los niveles del Lago de Chapala con series dendrocronológicas de *Taxodium mucronatum* Ten. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(14):55-68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i14.474>
- Villanueva-Díaz J., Cerano J., Estrada J., Constante V. y Stahle D. 2014. Reconstrucción del escurrimiento histórico en la cuenca alta del río Nazas, Durango. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* XIII(1): 21-25
- Villanueva-Díaz J., Cerano J., Estrada J., Morán R. y Constante V. 2010. Precipitación y gasto reconstruido en la cuenca baja del río Nazas. *Revista mexicana de ciencias forestales* 1(1): 25-37.
- Villanueva-Díaz J., Fulé., Cerano J., Estrada J. y Sánchez I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México* 34 (105): 37-69.
- Villanueva-Díaz J., Gómez A., Cerano J., Rosales S., Estrada J., Castruita L y Martínez A. 2017. La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(3): 55-74
- Villanueva-Díaz J., Gómez A., Estrada J. y Martínez A. 2020. Reconstrucción de la precipitación y caudal medio del río Piaxtla mediante anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Madera y bosques* 26(3), e2631653. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631653>
- Villanueva-Díaz J., Martínez A., Rubio E., Chávez A., Benavides J., Cerano J, y Estrada J. 2021. Reconstrucción dendrohidrológica De Escurrimientos En La subregión hidrológica Coahuayana, Estado De Jalisco. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 12 (65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.873>