



Reconstrucción de la precipitación y caudal medio del río Piaxtla mediante anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Precipitation and mean streamflow reconstruction on Piaxtla River based on tree-ring width series from *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

José Villanueva Díaz¹, Armando Gómez Guerrero^{2*}, Juan Estrada Ávalos¹ y Aldo R. Martínez Sifuentes¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CENIDRASPA Gómez Palacio, Durango. México. villanueva.jose@ininfp.gob.mx; estradajuan@ininfp.gob.mx; im_aldo09@hotmail.com

² Colegio de Postgraduados. Posgrado en Ciencias Forestales. Montecillo, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia. agomezg@colpol.mx

RESUMEN

La reconstrucción de variables hidroclimáticas es importante para comprender el funcionamiento de las cuencas forestales y tomar decisiones sobre su manejo. En este trabajo se reconstruyó la precipitación y el caudal medio a partir de información de anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en la cuenca del río Piaxtla. Con la información de siete series dendrocronológicas, se construyó una sola cronología regional. Se probó la correlación de la cronología regional con eventos de fenómenos océano-atmósfera como El Niño Oscilación del Sur, Oscilación Decadal del Pacífico, Oscilación Multidecadal del Atlántico e Índices de la Severidad de Sequía de Palmer. Los resultados mostraron que fue posible la reconstrucción de la precipitación de noviembre-abril y el caudal medio noviembre-agosto a partir de la serie de madera temprana con ecuaciones verificadas y validadas: Precipitación = $-271.538 + 447.764 \times (\text{índice de madera temprana})$, ($r = 0.85, n = 49, p < 0.0001$) y caudal medio = $5.123 + 0.623 \times \log_{10}(\text{índice de madera temprana})$, ($r = 0.68, n = 46, p < 0.001$). Excepto por la Oscilación Multidecadal del Atlántico, todos los fenómenos globales mostraron correlación significativa con la información de los anillos de crecimiento. Este estudio confirma que los bosques de *P. menziesii* de la Sierra Madre Occidental son altamente sensibles al clima, lo que se refleja en la anchura de anillos de crecimiento y a su vez en la variabilidad del caudal medio de la cuenca. Por lo anterior se debe aprovechar el potencial de este tipo de trabajos para prever los cambios en la disponibilidad de recursos hídricos, así como ampliar su uso en la valoración de servicios ambientales hidrológicos.

PALABRAS CLAVE: anillos de crecimiento, dendrocronología, hidrología forestal, variación climática.

ABSTRACT

The hydroclimatic reconstruction is relevant to understand how a forest watershed works and take decisions about its management. In this study the precipitation and streamflow on Piaxtla river watershed was reconstructed, using tree-ring width index values from *Pseudotsuga menziesii*. From seven dendrochronological series, a regional series (RS) was built. The correlation of RS with ocean-atmosphere phenomena like El Niño/Southern Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation, and Palmer Drought Severity Index was tested. Results showed the reliability of reconstructing the November-April precipitation and the November-August streamflow from the early wood series with verified and validated equations: Precipitation = $-271.538 + 447.764 \times (\text{Early wood index})$, ($r = 0.85, n = 49, p < 0.0001$) and Streamflow = $5.123 + 0.623 \times (\log_{10}(\text{Early wood index}))$, ($r = 0.68, n = 46, p < 0.001$). Except for the Atlantic Multidecadal Oscillation, all climate circulatory events had significant correlation to the dendrochronological information. This study confirms the high sensibility of *P. menziesii* in the Sierra Madre Occidental reflected in a high correlation among tree-ring width series and hydroclimatic variables. For this reason, the potential of this study should be expanded to monitor any change in the availability of water resources and for the valuation of hydrological environmental services.

KEYWORDS: tree-rings, dendroclimatology, forest hydrology, climatic variation.

INTRODUCCIÓN

La estimación del caudal medio de un río, a partir de series de anillos de crecimiento de especies forestales, resulta interesante por las siguientes razones: (i) la posibilidad de realizar una reconstrucción histórica de la variabilidad del caudal medio en escalas de tiempo mayores a las de los registros de estaciones meteorológicas, (ii) establecer la línea base de los servicios ambientales hidrológicos en una región, (iii) obtener información confiable para establecer políticas de administración de recursos hidrológicos y (iv) comprender efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Coulthard y Smith, 2016; Chen y Yuan, 2016; Chen *et al.*, 2016; Ferrero, Villalba, De Membela, Hidalgo y Luckman, 2015). Por otra parte, conocer la variabilidad del caudal de un río es importante, no solo con fines ecológicos, sino también con fines seguridad alimentaria ya que generalmente en las zonas bajas de una cuenca se encuentran áreas agrícolas y acuícolas (De la Lanza Espino, Rodríguez y Pérez, 2015).

El río Piaxtla es el segundo más importante de la costa del estado de Sinaloa (Frías-Espericueta *et al.*, 2014) y su geomorfología especial (Murphy *et al.*, 2006) da lugar a una riqueza en biodiversidad vegetal y animal (Domínguez-Domínguez, Vila, Pérez-Rodríguez, Remón y Doadrio, 2011; Ruiz-Campos, Camarena-Rosales, Varela-Romero, Sanchez-Gonzales y De La Rosa-Velez, 2003; Santiago-Reyes, Etter y Kristen, 2015; Santillán-Hernández *et al.*, 2010). Dada la relación entre las zonas productivas agrícolas y mineras de las partes altas de la cuenca el río Piaxtla, surge la necesidad de realizar estudios para comprender la variación de su caudal medio y disponibilidad de agua (Frías-Espericueta *et al.*, 2014). El río Piaxtla es importante por los servicios ambientales hidrológicos y de recreación que aporta a la región. Aunque actualmente la condición del río se considera ecológicamente estable por la baja presión de uso de agua (De la Lanza Espino *et al.*, 2015) y por las tasas anuales de deforestación relativamente bajas (0.21%) (Monjardín-Armenta, Pacheco-Angulo, Plata-Rocha y Corrales-Barraza, 2017), la obtención de datos sobre la variabilidad histórica de su caudal es importante para

establecer la línea base y caracterizar su variabilidad en el mediano y largo plazo, así como para conocer los cambios que pudieran poner en riesgo los recursos hídricos en un futuro.

La reconstrucción de datos hidroclimáticos mediante testigos climáticos o “*proxies*”, como son los anillos de crecimiento de los árboles, permiten extender la información en escalas de siglos y facilitan la identificación de eventos extremos de baja frecuencia del caudal, los cuales están ligados a la variabilidad climática a nivel geográfico y a probables efectos recientes de cambio climático (Castruita-Esparza *et al.*, 2016; Cook, Seager, Cane y Stahle, 2007; Stahle *et al.*, 2016).

En este trabajo se desarrolló la reconstrucción del caudal medio y precipitación estacional en la cuenca del río Piaxtla, en Sinaloa. Tanto la reconstrucción de la precipitación como la del caudal medio se realizaron a partir de la variación del ancho de anillos de crecimiento de árboles de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco presentes en la cuenca de estudio. La hipótesis es que la información dendrocronológica de *P. menziesii* explica la variabilidad de la precipitación y del caudal medio del área de influencia del río Piaxtla. Con este propósito se emplearon registros de precipitación y de volúmenes del caudal medio, los cuales se correlacionaron con parámetros de anillos de crecimiento de *P. menziesii* y, a partir de estos datos, se realizaron reconstrucciones de precipitación y caudal medio para los últimos 400 años. Este tipo de estudios son útiles para generar conocimiento sobre la variación histórica del caudal y detectar tendencias que indiquen la necesidad de cambios de manejo en la cuenca o los riesgos en la disponibilidad de recursos hídricos. Ante la falta de información de estaciones de aforo en muchos lugares de México, los anillos de crecimiento permiten un estudio retrospectivo de la precipitación y del caudal medio en una cuenca (Villanueva *et al.*, 2017).

OBJETIVOS

Reconstruir el caudal medio y la precipitación estacional en la cuenca del río Piaxtla, a partir de la información de los



anillos de crecimiento de *P. menziesii* y registros de precipitación y caudal medio, y explicar la relación de variables con respecto a fenómenos climáticos globales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El río Piaxtla se ubica entre los $23^{\circ}38'00''$ y $24^{\circ}31'00''$ de latitud Norte y $105^{\circ}19'00''$ y $106^{\circ}50'00''$ de longitud Oeste (Fig. 1). El área de drenaje del río Piaxtla es de 6227 km^2 , de la cual, 40% y 60% se ubican los estados de Durango y Sinaloa, respectivamente. Las regiones que componen la cuenca son río Piaxtla-1 y río Piaxtla-2, con aportaciones principalmente de los arroyos Quebrada del Pilar, río Verde, Quebrada de la Vinata y Alameda y río Tayoltita. Sin embargo, este estudio se concentra en la región río Piaxtla-1 que incluye bosques mixtos de coníferas y la cual drena una superficie de 4842.7 km^2 , con un volumen de escurrimiento de $981.7 \times 10^3 \text{ m}^3$, que se produce desde el nacimiento del río Piaxtla en altitudes de 2900 m (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2013).

Los climas dominantes del área son el BS1(b) en la zona baja, que corresponde a un clima seco, con lluvias en verano, con un cociente P/T mayor a 22.9 y temperatura

media anual mayor a 18°C , la temperatura del mes más frío es menor a 18°C (García, 2004). En la zona alta el clima es de tipo semicálido (A)C(w2)(w), con temperatura media anual mayor a 18°C , régimen de lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor a 40 mm, el mes más húmedo es al menos 10 veces mayor en precipitación con respecto a la estación seca, con una relación P/T mayor a 55 (García, 2004; Fig. 1).

Muestreo

Se consideraron siete sitios de muestreo a lo largo del parteaguas la Sierra Madre Occidental (SMO) (Fig. 1, Tabla 1), ubicados en terrenos que drenan hacia el Pacífico y que, por lo tanto, están asociados con los procesos hidrológicos de la cuenca del río Piaxtla. Aunque la vegetación natural se compone de bosques mixtos de coníferas de los géneros *Pseudotsuga* y *Pinus*, para este estudio únicamente se consideró información de *Pseudotsuga menziesii* que es una especie altamente sensible a la variación de la precipitación (Castruita-Esparza *et al.*, 2016; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz y Burns, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2014; Castruita-Esparza *et al.*, 2019).

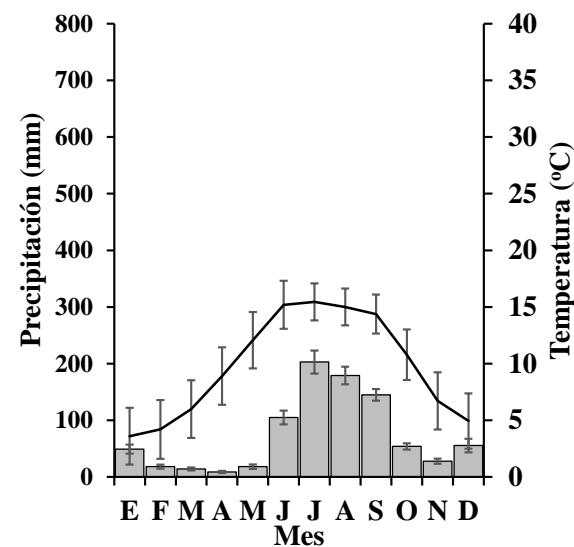
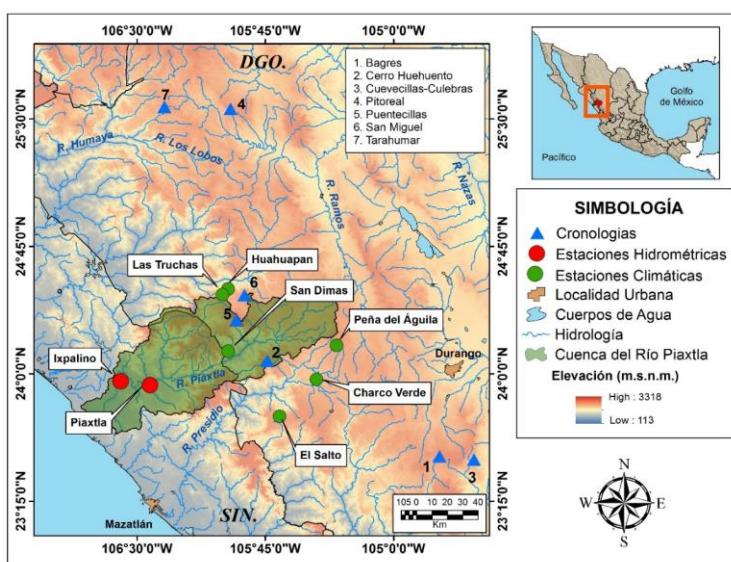


FIGURA 1. Ubicación geográfica y climograma del área de estudio.

El climograma muestra valores promedio y error estándar de las seis estaciones meteorológicas de la parte alta de la cuenca del río Piaxtla.

TABLA 1. Características generales de los sitios de muestreo, estaciones meteorológicas cercanas y estación hidrométrica del área de estudio

Sitio	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Extensión (años)
-----Series Dendrocronológicas-----				
Bagres	23.563	105.959	2823	1746-2013 (268)
Cerro Huehuento	24.076	105.737	2970	1552-2006 (455)
Cuevecillas-Culebras	23.495	104.536	2300	1863-2012 (150)
Pito Real	25.565	105.956	2700	1693-2003 (311)
Puentecillas	24.318	105.919	2680	1573-2007 (435)
San Miguel de Cruces	24.463	105.874	2609	1839-2013 (175)
Tarahumar	25.574	106.346	2580	1724-2003 (280)
-----Estaciones Meteorológicas-----				
Las Truchas	24.467	106.000	2300	1962-1985 (24)
Huahuapan	24.500	105.967	1150	1966-1998 (39)
San Dimas	24.133	105.967	1845	1961-1985 (25)
Peña del Aguila	24.167	105.333	1896	1963-2003 (41)
Charco Verde	23.967	105.450	2163	1954-1990 (37)
El Salto	23.750	105.667	2538	1963-2003 (41)
-----Estación Hidrométrica-----				
Piaxtla	23.933	106.425	164	1958-2009 (52)

Entre paréntesis se indica los años de medición de datos

Red dendrocronológica

Las cronologías se procesaron de acuerdo con los métodos convencionales de dendrocronología (Grissino-Mayer, 2001; Stokes y Smiley, 1968). A partir de las siete series dendrocronológicas individuales de *Pseudotsuga menziesii*, se creó una sola serie dendrocronológica regional (CR) de anillo total, madera temprana y tardía (Tabla 1). La generación de la serie regional se fundamentó en significancia ($p < 0.05$) de las correlaciones simples entre series y en el hecho de que, al integrarlas en una sola base de datos y verificar su calidad de fechado con el programa COFECHA, se corroboró que todas las series mostraban una respuesta climática común (Fritts, 1976). Para fines de la calidad de fechado con COFECHA, se verificó que en todas las series se alcanzara el valor mínimo de correlación

($r = 0.328$ $p < 0.01$) (Holmes, 1983). La estandarización se realizó con el programa ARSTAN ajustando un modelo exponencial negativo (Cook, 1987). Se consideraron series dendrocronológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca del río Piaxtla (Fig. 1), dado que la variabilidad de los escurrimientos en una cuenca está correlacionada con las cuencas vecinas, como consecuencia del comportamiento del clima que generalmente afecta amplias extensiones geográficas (Cook y Jacoby, 1983; Woodhouse, 2001). La región donde se realizó este estudio es una de las más sensibles a escala mundial, para fines de reconstrucción dendroclimática, pues evidencia una alta correlación entre los anillos de crecimiento de coníferas y la precipitación (Wilson et al., 2010; Castruita-Esparza et al., 2019).



Datos de precipitación e hidrométricos

La información del caudal medio de la estación hidrométrica Piaxtla se obtuvo de la base hidrométrica BANDAS (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2003). Los datos de precipitación se obtuvieron de la base ERIC III (IMTA, 2013), eligiendo seis estaciones meteorológicas (Fig. 1 y Tabla 1), las cuales se seleccionaron de acuerdo con los siguientes criterios: (i) cercanía a la cuenca del río Piaxtla; (ii) grado de correlación de los datos de precipitación anual con las bandas de crecimiento de madera temprana, madera tardía y anillo total, (iii) extensión de información hidroclimática y (iv) cercanía a la zona forestal en la cuenca de estudio. El promedio de estas seis estaciones meteorológicas se utilizó para representar las condiciones generales de precipitación en la zona de estudio. Las estaciones consideradas contaban con datos continuos de 34 años en promedio, dentro del período de 1961 a 2003. Aunque no todas las estaciones presentaban información en el mismo intervalo de tiempo, la correlación de la precipitación media mensual entre estaciones fue alta 0.9 ($p < 0.01$), con una estimación de precipitación media anual de 877 mm (± 93 mm) en la cuenca. Los valores de precipitación media mensual por estación se presentan en el Anexo 1.

Series de crecimiento y datos climáticos

Las series de crecimiento de madera temprana, tardía y de anillo total de la cronología regional (CR), en sus versiones estándar y residual, se compararon con los valores del caudal medio y con la precipitación media mensual estimada a partir de las seis estaciones climáticas seleccionadas. Se probaron diferentes combinaciones estacionales que incluyeron períodos de dos a doce meses, de tal forma que se pudiera identificar la secuencia de meses (período estacional) con la mayor correlación entre las variables precipitación y caudal medio con las series de ancho de anillo. Una vez que se maximizó la correlación entre las series de anillos y los datos de precipitación medidos y de caudal medio, se probaron modelos de regresión lineal para utilizarlos con fines de reconstrucción

de caudal medio y precipitación en años donde aún no existían datos climáticos e hidrométricos.

Calibración y verificación de los modelos de reconstrucción

Los registros de caudal medio y de precipitación se dividieron en dos subperiodos; con el primer subperiodo (1979-2003, $n = 25$) se generaron ecuaciones de regresión para predecir caudal medio y precipitación a partir de las series de crecimiento en sus versiones estándar y residual, este proceso se conoce como calibración. El segundo subperiodo (1955-1978, $n = 24$) se empleó para predecir precipitación y caudal medio a partir de las ecuaciones generadas del primer subperiodo, este paso corresponde a la verificación. Para valorar el modelo de regresión del proceso calibración-verificación, se empleó el coeficiente de correlación de la calibración y verificación, la reducción del error, la prueba de “t” para comparar la media de datos reales y reconstruidos y la prueba de los signos para medir la efectividad con la que el modelo acierta en las predicciones. Estos son los principales estadísticos que se emplean en los estudios de reconstrucción (Chen y Yuan, 2016; Stahle y Cleaveland, 1992; Woodhouse, 2001).

Influencia de fenómenos circulatorios

Se probó la correlación entre la CR y los fenómenos circulatorios como El Niño Oscilación del Sur 3.4 (ENSO, por sus siglas en inglés), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) y el Índice de la Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Magaña, 1999; Magaña, Vázquez, Pérez y Pérez, 2003; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et. al.*, 2016; Stahle *et al.*, 2011; Wilson *et al.*, 2010).

RESULTADOS

Red dendrocronológica

La información de las siete cronologías y la CR se resume en la tabla 2. La intercorrelación entre series varió de 0.60 a

0.76. La CR se extendió de 1552 a 2013 (462 años) y mantuvo parámetros aceptables para fines de reconstrucción climática (Fritts, 1976).

Reconstrucción de precipitación

La máxima correlación (Pearson) que se obtuvo entre las series dendrocronológicas y los datos climáticos fue para la CR de madera temprana (estándar) y la precipitación noviembre-abril ($r = 0.85$, $p < 0.0001$, $n = 49$, 1955- 2003). El análisis de calibración y verificación de este período

indicó que una ecuación lineal es factible para realizar la reconstrucción de la precipitación (Tabla 3). La ecuación validada (1) se muestra a continuación y la reconstrucción se ilustra en la figura 2.

$$Y = -271.5384123 + 447.764427 \cdot X_i \quad (1)$$

donde:

Y = precipitación reconstruida

X_i = índice de madera temprana (estándar)

TABLA 2. Parámetros dendrocronológicos de las series de crecimiento de *P. menziesii*, distribuidas en la Sierra Madre Occidental y asociadas al río Piaxtla.

Nombre del sitio	¹ IC	² SM	³ D.E. (mm)	⁴ AC	⁵ S/R	⁶ EPS > 0.85
Bagres	0.71	0.63	0.243	0.22	28.7	7 (1795-2013)
Cerro Huehuento	0.67	0.88	0.278	0.36	10.4	7 (1722-2006)
Cuevecillas-Culebras	0.60	0.75	0.151	0.35	8.4	8 (1840-2012)
Pito Real	0.75	0.68	0.289	0.16	17.5	3 (1730-2003)
Puentecillas	0.66	0.82	0.187	0.29	15.9	5 (1657-2007)
San Miguel de Cruces	0.66	0.77	0.179	0.30	2.0	7 (1853-2013)
Tarahumar	0.70	0.78	0.214	0.16	15.5	7 (1771-2003)
Cronología Regional	0.62	0.19	0.194	0.35	40.0	7 (1650-2013)

¹IC: Intercorrelación entre series, mide la señal común de las series involucradas; ²SM: Sensibilidad Media, expresa el cambio relativo en el crecimiento de un año con relación al siguiente (Fritts, 1976); ³D.E.: Desviación Estándar; ⁴AC: Autocorrelación de Primer Orden, grado de influencia que ejerce el año de crecimiento previo sobre el año de crecimiento actual; ⁵S/R: Relación señal-ruido, expresa la intensidad de la señal común observada entre las series de una cronología; ⁶EPS: Número de árboles con los cuales se alcanza una Señal Expresada de la Población (EPS) con valor significativo de 0.85 (Wigley, Briffa, & Jones, 1984), y entre paréntesis el periodo para el cual EPS>0.85.

TABLA 3. Estadísticos de verificación entre los datos de precipitación observados y reconstruidos.

Período	Correlación de Pearson ¹	Reducción del error ²	Valor de "t" ³	Producto de signos ⁴
1955-1978	0.80*	0.63*	3.6*	3*
1979-2003	0.93*	0.86*	4.8*	1*

¹La significancia de los dos períodos de calibración y verificación se mantuvo ($p < 0.05$). ²Los valores positivos indican la factibilidad del modelo para predecir fuera del período de calibración (Fritts, 1976). ³Las medias de datos observados y reconstruidos es igual ($p < 0.05$). ⁴La frecuencia con la que acierta el modelo en las predicciones es mayor a las veces que no acierta ($p < 0.05$) (Conover y Conover, 1980). *Significativo ($p < 0.05$).

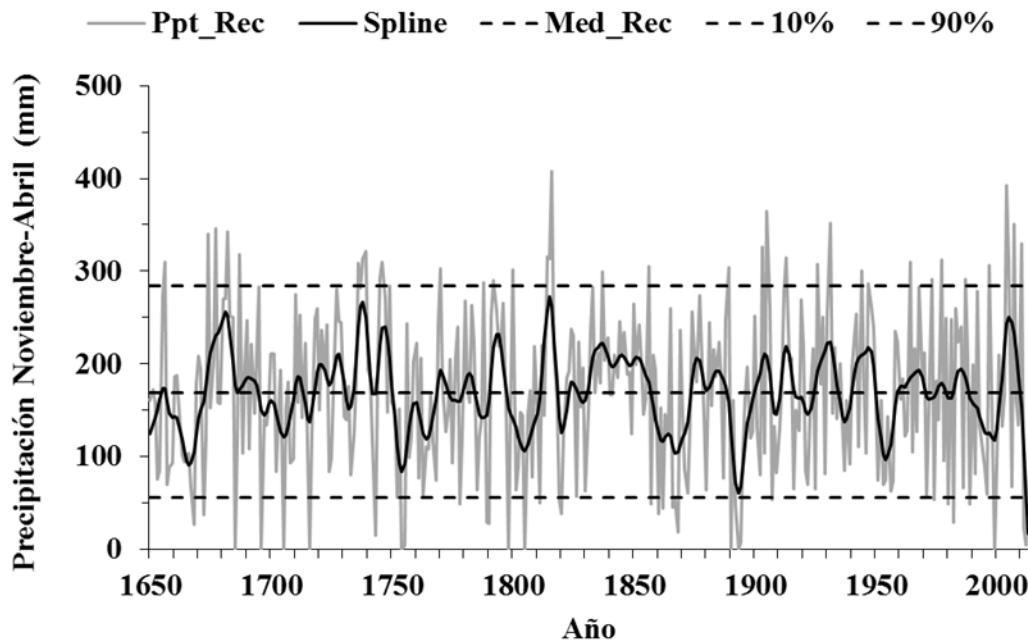


FIGURA 2. Precipitación estacional (noviembre-abril) reconstruida (Ppt-Rec) para el río Piaxtla; curva flexible (spline) a nivel década y mediana de la reconstrucción (Med_Rec).

Las líneas punteadas extremas indican datos abajo de 10% y superiores a 90% de acuerdo con la distribución de frecuencias y con el criterio de eventos extremos definido por el Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014).

En 3% de los casos (14 de 433), la ecuación (1) produjo valores negativos, los cuales se asumieron como cero. La mayoría de estos casos se presentaron antes del año de 1900 (13 de 14). Aunque el valor cero no es la determinación exacta de precipitación de esos años en particular, se consideró dicho valor ya que los bajos crecimientos de los anillos indicaron años secos los cuales quedaron reflejados en la curva suavizada (spline) de la figura 3 con valores entre 60 mm y 116 mm de precipitación anual.

Reconstrucción del caudal medio

La mayor correlación entre los datos dendroclimáticos y el caudal medio fue entre la CR de madera temprana (residual) y el caudal medio acumulado de noviembre-agosto. En este caso, como se sugiere en la literatura (Brito-Castillo, Díaz-Castro, Salinas-Zavala y Douglas, 2003), fue necesario transformar a logaritmo base 10 los datos hidrométricos para asegurar la máxima correlación significativa, que fue de 0.68 ($p < 0.001$, $n = 46$). Similarmente a lo que se hizo

con los datos de precipitación, se realizó un procedimiento de calibración y verificación separando la información en dos subperíodos. El resumen de este análisis indicó que la ecuación de regresión lineal con la variable log base 10 es factible para reconstruir valores del caudal medio (Tabla 4). La ecuación validada (2) para el período se muestra a continuación y la reconstrucción se ilustra en la figura 2.

$$Y = 5.1229359 + 0.6237508 \cdot X_i \quad (2)$$

donde:

Y = Volumen acumulado noviembre-agosto (log10)

X_i = índice de madera temprana.

Influencia de fenómenos circulatorios en la variabilidad hidroclimática

La tabla 5 muestra la relación entre los índices de crecimiento y los fenómenos circulatorios. Excepto por la Oscilación Multidecadal del Atlántico, todos los fenómenos muestran correlación significativa.

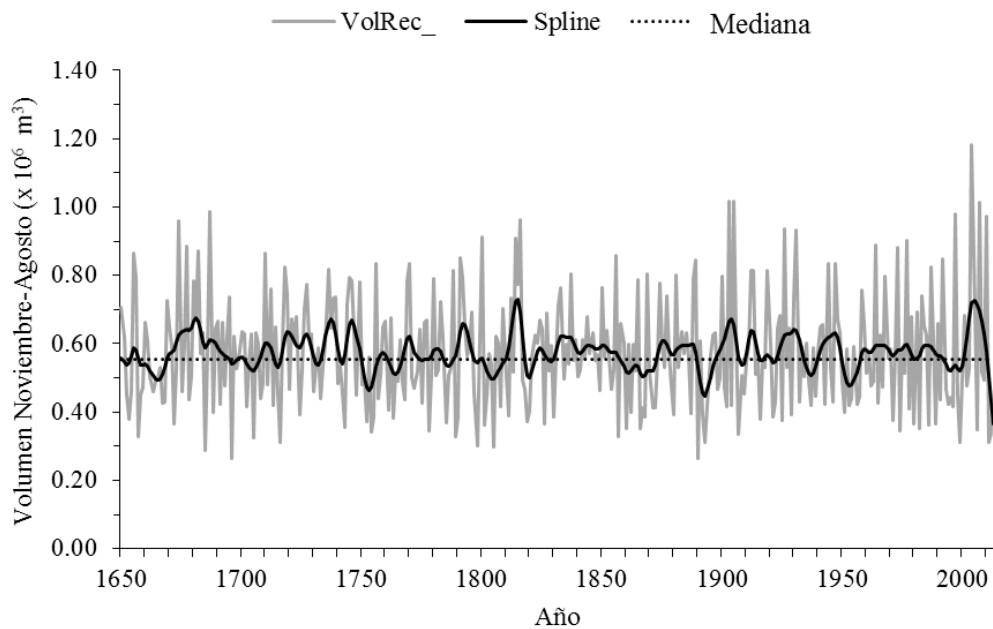


TABLA 4. Estadísticos de verificación entre los datos de precipitación observados y reconstruidos.

Periodo	Correlación de Pearson ¹	Reducción del error ²	Valor de "t" ³	Prueba de signos ⁴
1959-1981	0.71*	0.49*	3.4*	5*
1982-2004	0.66*	0.43*	3.9*	5*

¹La significancia de los dos períodos de calibración y verificación se mantuvo ($p < 0.05$). ²Los valores positivos indican la factibilidad del modelo para predecir fuera del período de calibración (Fritts, 1976). ³Las media de datos observados y reconstruidos es igual ($p < 0.05$). ⁴ La frecuencia con la que acierta el modelo en las predicciones es mayor a las veces que no acierta ($p < 0.05$) (Conover & Conover, 1980).

TABLA 5. Asociación entre los diferentes índices de fenómenos circulatorios y la serie regional de madera temprana y de anillo total de la especie *Pseudotsuga menziesii* en la parte alta de la cuenca del río Piaxtla en el estado de Durango.

Índice	Meses	Período (años)	Correlación	Probabilidad	Serie de Madera
SOI Reconstruido ¹	nov-feb	1805-1977 (103)	-0.62	0.0001	Temprana
TRI ²	ene-abr	1894-1994 (134)	0.53	0.0001	Temprana
MEI ³	ene-may	1880-2012 (133)	0.51	0.0001	Temprana
PDO ⁵	Anual	1856-2012 (113)	0.28	0.0025	Anillo total
AMO ⁶	Anual	1949-2014 (157)	0.04	0.5800	Temprana
PDSI ⁷	jul-sep	1925-2012 (98)	0.60	0.0001	Anillo total

¹SOI Reconstruido noviembre-febrero (Stahle et al., 1998). ²TRI enero-abril (Wright, 1979). ³MEI³ índice multivariado de ENSO (Wolter y Timlin, 2011). ⁵PDO marzo-diciembre (Mantua, Hare, Zhang, Wallace, y Francis, 1997). ⁶AMO julio-diciembre (Van Oldenborgh, Te Raa, Dijkstra, y Philip, 2009). ⁷PDSI (Stahle et al., 2016).



Relación entre los registros de precipitación y de volúmenes

Los datos instrumentales (1959-2003) disponibles de precipitación estacional (noviembre-abril) y el volumen de caudal medio (noviembre-agosto) se correlacionaron significativamente con un valor de 0.66 ($p < 0.001$) y, específicamente para el período 1959-1999, la correlación incrementó hasta 0.71 ($p < 0.001$), lo que indica que la precipitación estacional de noviembre a abril explica hasta en 50% el volumen de caudal medio (Fig. 4).

DISCUSIÓN

En este estudio se incluyeron cronologías de *P. menziesii* procedentes de dentro y fuera de la cuenca del río Piaxtla, pero esto no impidió crear una CR con una señal climática común, la cual reflejó estadísticamente la variabilidad que ha ocurrido en la cuenca o región hidrológica de estudio. Lo anterior confirma que los registros de los anillos de crecimiento preservan información de regiones geográficas más amplias que la delimitación de una sola cuenca, como lo han señalado otros autores (Brito-Castillo *et al.*, 2003; Kwak *et al.*, 2016; Lara, Villalba, & Urrutia, 2008; Stahle y Cleaveland, 1992). Los parámetros de la CR son comparables con las de otras especies forestales altamente sensibles al clima cuya información se puede consultar en bancos internacionales de datos (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2020) y en investigaciones con coníferas del norte de México (Meko y Woodhouse, 2005; Irby, Fulé, Yocom y Villanueva-Díaz, 2013; Pompa-García, Rodríguez-Flores, Cerano-Paredes, Valdez-Cepeda y Roig-Junent, 2013).

La factibilidad de la CR y la correlación con la precipitación y datos de caudal medio permitió la reconstrucción histórica de estas variables, lo que confirma la hipótesis del estudio y demuestra el uso potencial de los anillos de crecimiento en el estudio de los recursos hídricos, particularmente cuando los datos de medición instrumental son limitados o inexistentes (Mundo *et al.*, 2012; Woodhouse, Gray y Meko, 2006). Las redes dendrocronológicas y su relación con el clima y con la hidrología se han empleado en varios estudios (Cook y Jacoby, 1983; Villanueva-Díaz *et al.*, 2005; Woodhouse *et al.*, 2006; Woodhouse, Stahle y Villanueva Diaz, 2012; Villanueva *et al.*, 2017) y, dada la alta correlación observada en este trabajo, se debería considerar con más frecuencia en México; por ejemplo, para cuantificar la oferta de servicios ambientales hidrológicos o los efectos de cambio climático en las cuencas forestales.

El hecho de que la CR de *Pseudotsuga menziesii* haya mostrado la mayor correlación significativa con la precipitación acumulada de noviembre-abril indica que en la Sierra Madre Occidental la cantidad de lluvia de invierno es muy importante para el crecimiento de primavera y verano. Esto se ha explicado en parte por una relación directa con la capacidad del perfil del suelo para almacenar oportunamente agua y evitar que los árboles se estresen hídricamente en los meses más secos del año (Castruita-Esparza *et al.*, 2016; Gomez, Powers, Singer y Horwath, 2002; Castruita-Esparza *et al.*, 2019; Correa-Díaz *et al.*, 2019).

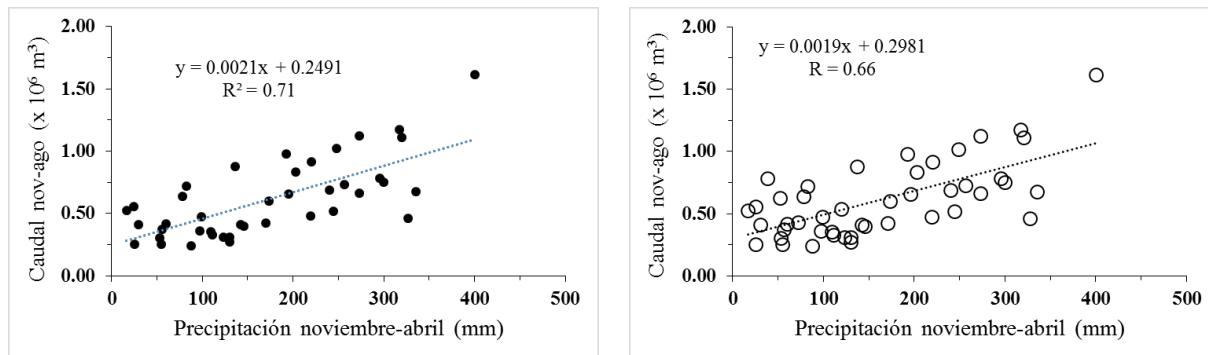


FIGURA 4. Correlación entre la precipitación acumulada de noviembre a abril y el caudal medio acumulado de noviembre a agostos, para el período 1959-2003 (puntos negros) y 1959-1999 (puntos sin relleno).

Los resultados encontrados son similares a los de otros estudios dendrocíclicos del norte y centro de México, donde el ancho de la madera temprana y del anillo total se correlacionan con la precipitación invernal que ocasionalmente se extiende hasta principios de la primavera del año siguiente (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; González-Elizondo *et al.*, 2005; José Villanueva *et al.*, 2014).

Eventos extremos

Los eventos de sequía detectados de 1662-1668, 1696, 1715-16, 1740-1743, 1797-1798 y 2011-2013, muestran coincidencia con períodos secos registrados para la cuenca del río Nazas y para el suroeste de Durango; además, coinciden con eventos que impactaron el norte de México, como se confirma también en el Atlas de Sequía para México (Stahle *et al.*, 2016). La sequía de 1950, una de las más intensas en los estados de Durango y Chihuahua (Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 2012; Villanueva Díaz *et al.*, 2015) no destaca en este estudio (Tabla 6) debido posiblemente a que la selección de eventos extremos en este estudio fue más estricta apoyándose a los percentiles $<10\%$ y $<90\%$ (IPCC, 2014). Sin embargo, el año seco de 1950 se ha detectado en regiones del norte de México y suroeste de los EUA, donde se considera una de las más severas de los últimos siglos (Cook *et al.*, 2007; Méndez y Magaña, 2010; Woodhouse, Meko, MacDonal, Stahle y Cook, 2010). No obstante, es de destacarse que la sequía de 2011-2013, con tres años consecutivos, se identificó claramente en este y otros estudios (Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 2012; Villanueva Díaz *et al.*, 2015).

Como se puede observar en la tabla 6, el año de 1987 y el periodo de 2004-2005 se clasifican como extremos húmedos, esto concuerda con lo publicado por Castruita-Esparza *et al.* (2019), quienes los clasifican como años de mayor humedad con respecto a la precipitación media.

Igualmente, Correa-Díaz *et al* (2019) identificaron el año 2005 con mejores índices de vegetación y productividad en los bosques de alta montaña del centro de México, atribuyendo su resultado a mayor precipitación. De acuerdo con la tabla 6, desde 1816 (hace 204 años) no se presentan tres años consecutivos con humedad arriba del promedio y en el percentil $> 90\%$, en cambio los periodos secos consecutivos de tres años ($< 10\%$) han ocurrido hace 7, 126 y 152 años.

El caudal medio del río está relacionado con los ritmos de crecimiento de los bosques de la parte alta de la cuenca donde, a su vez, la magnitud de la precipitación invernal determina el crecimiento de *P. menziesii*. La correlación significativa encontrada entre la precipitación noviembre-abril y el caudal medio de noviembre-agosto indica que estas variables tienen potencial de uso para comprender el comportamiento histórico de entradas y salidas de agua en una cuenca.

El aprovechamiento del agua con fines de riego en una superficie de 21 624 ha del distrito de riego 108 en Sinaloa demanda $0.264 \times 10^6 \text{ m}^3$, que corresponde a 16% del volumen disponible en el río Piaxtla (Conagua, 2011). Sin embargo, de acuerdo con De la Lanza Espino *et al.*, 2015, en una estimación de los gastos ecológicos de la cuenca en estudio con un análisis hidrométrico basado en 36 años de registros, el ecosistema requiere de $0.939 \times 10^6 \text{ m}^3$ (57% del volumen anual promedio disponible). Lo anterior destaca la importancia de conocer la línea base de una cuenca por métodos indirectos, como los anillos de crecimiento, para medir el efecto de demanda de agua sobre los volúmenes históricos de una cuenca (Meko y Woodhouse, 2005). Aunque el caudal ecológico no es igual al caudal medio, la reconstrucción histórica de la salida de agua en una cuenca proporciona información de los tiempos de retorno de eventos extremos, lo cual es necesario para desarrollar estrategias de manejo de recursos hídricos (Sánchez y Barrios, 2011).



TABLA 6. Relación de eventos secos y húmedos detectados en la reconstrucción estacional de caudal para la cuenca del río Piaxtla.

Años aislados	Extremos secos (<10%)		Extremos húmedos (<90%)		
	Dos años	Tres años	Años aislados	Dos años	Tres años
1668	1754-1755	1866-1868	1656	1738-1739	1814-1816
1672	1789-1790	1892-1894	1674	1745-1746	
1685	1819-1820	2011-2013	1677	2004-2005	
1696	1989-1990		1682		
1705			1687		
1716			1736		
1743			1770		
1778			1788		
1798			1792		
1805			1800		
1811			1837		
1857			1856		
1860			1889		
1862			1903		
1890			1905		
1907			1913		
1974			1926		
1980			1931		
1982			1944		
			1947		
			1964		
			1973		
			1977		
			1987		
			1997		

Los eventos extremos son datos de los percentiles abajo de 10% y superiores a 90%, definidos por el IPCC (2014).

Caudal medio

Aunque se detectaron eventos extremos del caudal medio, el análisis por períodos de 25 años indicó que la mediana del caudal del río Piaxtla se ha mantenido en los últimos 364 años; sin embargo, en el período de 1950 a 1999 hubo una disminución aproximada de 50 000 m³ y es de destacarse que en los últimos 20 años se han presentado dos eventos extremos secos y húmedos (percentiles < 10% y > 90%) (Tabla 6). Por lo anterior, es importante hacer otro tipo de estudios en la cuenca para verificar si los cambios en cobertura forestal o un estrés hídrico general en el arbolado relacionado con menor transpiración pudieran estar asociados a esta variación (Rahmstorf y Coumou, 2011).

Relación con eventos circulatorios

La variabilidad hidroclimática en la cuenca del río Piaxtla se correlacionó con ENSO, que es uno de los patrones que provoca mayor impacto en el norte de México y en particular en el suroeste de Durango donde explica cerca de 40% de la variabilidad de la lluvia de invierno-primavera. La Sierra Madre Occidental en una de las regiones con más sensibilidad entre la dinámica de anillos de crecimiento y el clima (Wilson *et al.*, 2010). En particular, los estados de Chihuahua y Durango se consideran una región de teleconexión de ENSO, entre los fenómenos del Pacífico y los que ocurren al norte de México y sur de los Estados Unidos (Stahle *et al.*, 2016; Wilson *et al.*, 2010; Torbenson *et*

al., 2019). La fase cálida de ENSO, que provoca lluvias abundantes en invierno-primavera, favorece el incremento radial de las coníferas en la Sierra Madre (Castruita- Esparza, 2014) y la producción de agua (Villanueva *et al.*, 2014).

La correlación entre la CR del río Piaxtla y los índices de ENSO de este estudio son comparables con los observados en otros estudios donde se han probado otras regiones sensibles a ENSO en el mundo (Stahle *et al.*, 1998). También destaca la correlación significativa con el índice PDSI de julio-septiembre para el noreste de México, lo cual indica el alto potencial de esta reconstrucción para explicar la variabilidad hidroclimática histórica de cuencas hidrológicas que drenan hacia cuencas del Pacífico (Nicholas y Battisti, 2008; Villanueva *et al.*, 2014). Si la información de este tipo de estudio se fortalece con trabajos futuros, incluyendo el desarrollo dendrocronológico, se podrá analizar el comportamiento hidrológico de estas cuencas con mayor detalle, lo cual es de gran relevancia con fines de producción agrícola en la costa del Pacífico y para la conservación de ecosistemas que dependen del agua producida en estas cuencas.

Aunque el propósito del trabajo no fue hacer un análisis detallado de los indicadores climáticos globales incluyendo sus fases, es importante mencionar que en futuros trabajos se debe considerar hacerlo, ya que las fases de los índices climáticos dan información adicional sobre el gradiente de variación más amplio, ya sea con respecto a los continentes o regiones polares (Muñoz *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2018). Sin embargo, considerando el índice ENSO 3.4 y sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña), se observa que los eventos extremos de los años 1974, 1989-1990 y 2011 (Tabla 5) se han identificado como años de la fase fría (NOOA, 2020), mientras que los años 1973, 1977, 1987, 1997, 2004-2005 se han identificado como años de la fase cálida. Esta concordancia indica el potencial de utilizar la información dendrocronológica y asociarla con las fases de los indicadores climáticos.

CONCLUSIONES

La red dendrocronológica regional de *Pseudotsuga menziesii* es viable para fines de reconstrucción de la precipitación y del

caudal medio en el río Piaxtla. La combinación de siete cronologías en una sola cronología dendrocronológica regional mantuvo viables sus parámetros para la reconstrucción en el río Piaxtla abarcando un período 1650 a 2013 (363 años), considerando solamente el período en el que la EPS ≥ 0.85 .

La serie de madera temprana fue más sensible a la variación de la precipitación y del caudal medio. La precipitación estacional noviembre-abril y los gastos acumulados noviembre-agosto de la estación hidrométrica Piaxtla del período 1959-1999 se correlacionaron significativamente. La precipitación, el caudal medio y los anillos de crecimiento se correlacionan significativamente con el fenómeno de ENSO. La asociación entre los índices de madera temprana y de anillo total con los diversos índices de ENSO muestran valores de 0.6 y confirman que la región de la Sierra Madre es de las más importantes en el continente americano para analizar la influencia indirecta (teleconexión) de este fenómeno circulatorio.

Aunque la cuenca del río Piaxtla se considera hidrológicamente estable, los resultados de este estudio indican la necesidad de mediciones permanentes para prever cambios importantes en el caudal medio y establecer políticas que aseguren el abastecimiento de agua para diversos fines y garanticen la estabilidad de áreas ecológicas como los sistemas riparios de las partes bajas de la cuenca. Dada la sensibilidad climática de las especies arbóreas en esta región, el desarrollo de una red dendrocronológica más completa y de mayor extensión, que involucre otras especies de coníferas y latifoliadas, permitirá un mejor conocimiento de la variabilidad interanual y multianual del clima en esta región del país.

RECONOCIMIENTOS

El presente estudio se apoyó con el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación “CB-2016-01-283134”.

REFERENCIAS

- Bravo-Castillo, L., Díaz-Castro, S., Salinas-Zavala, C. A., & Douglas, A. V. (2003). Reconstruction of long-term winter streamflow in the



- Gulf of California continental watershed. *Journal of Hydrology*, 278(1–4), 39–50. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00131-8
- Castruita Esparza, L. U. (2014). *Variabilidad climática, eficiencia de uso de agua intrínseca y crecimiento del área basal en Bosques del norte de México*. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, México.
- Castruita-Esparza, L. U., Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Ramírez-Guzmán, M. E., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2016). Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 379–397. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.10.048
- Castruita-Esparza, L. U., Silva, L. C., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Correa-Díaz, A., & Horwath, W. R. (2019). Coping with extreme events: growth and water-use efficiency of trees in western Mexico during the driest and wettest periods of the past one hundred sixty years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(11), 3419–3431. doi: 10.1029/2019JG005294
- Cerano-Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola Ávila, J. G., Sánchez Cohen, I., & Valdez Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–44, doi: 10.21829/myb.2009.1521189.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369–388. doi: 10.1023/A:1024835630188
- Comisión Nacional del Agua [Conagua] (2011). *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/>
- Conover, W. J., & Conover, W. J. (1980). *Practical nonparametric statistics*. USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37–59.
- Cook, E. R., & Jacoby, G. C. (1983). Potomac River streamflow since 1730 as reconstructed by tree rings. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(10), 1659–1672.
- Cook, E. R., Seager, R., Cane, M. A., & Stahle, D. W. (2007). North American drought: reconstructions, causes, and consequences. *Earth-Science Reviews*, 81(1), 93–134. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.12.002
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., ... & Suárez-Espinoza, J. (2019). Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(1), 166–183. doi: 10.1029/2018JG004687
- Coulthard, B., & Smith, D. J. (2016). A 477-year dendrohydrological assessment of drought severity for Tsable River, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, 30(11), 1676–1690. doi: 10.1002/hyp.10726
- Chen, F., & Yuan, Y.-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). doi: 10.1007/s12665-016-5849-1
- Chen, F., Yuan, Y. J., Zhang, R. b., Wang, H. Q., Shang, H. M., Zhang, T. W., & Fan, Z. 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. doi: 10.1002/hyp.10788
- De la Lanza Espino, G., Rodríguez, S. A. S., & Pérez, J. L. C. (2015). Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas* 2015(87), 25–38.
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647–1992. *Climate Research*, 22(3), 237–244. doi: 10.3354/cr02223
- Domínguez-Domínguez, O., Vila, M., Pérez-Rodríguez, R., Remón, N., & Doadrio, I. (2011). Complex evolutionary history of the Mexican stoneroller *Campostoma ornatum* Girard, 1856 (Actinopterygii: Cyprinidae). *BMC Evolutionary Biology*, 11(1), 1–20. doi: 10.1186/1471-2148-11-153.
- Fernández, A., Muñoz, A., González Reyes, Á., Aguilera Betti, I., Toledo, I., Puchi, P., . . ., & Mundo, I. A. (2018). Dendrohydrology and water resources management in south-central Chile: lessons from the Río Imperial streamflow reconstruction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2921–2935. doi: 10.5194/hess-22-2921-2018
- Ferrero, M. E., Villalba, R., De Membela, M., Hidalgo, L. F., & Luckman, B. H. (2015). Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America. *Journal of Hydrology*, 525, 572–584. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.004
- Frías-Espericueta, M., Mejía-Cruz, R., López, I. O., Muy-Rangel, M., Rubio-Carrasco, W., Aguilar-Juárez, M., & Voltolina, D. (2014). Metal discharges by Sinaloa rivers to the coastal zone of NW Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(2), 132–136. doi: 10.1007/s00128-013-1158-5
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. New York: Academic Press.

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen* (5a ed.), México D.F.: Instituto de Geografía UNAM.
- Gomez, A., Powers, R., Singer, M., & Horwath, W. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1334-1343. doi: 10.2136/sssaj2002.1334
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Návar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & 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. doi: 10.1016/j.foreco.2005.03.012
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 44, 69-78.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] (2003). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Jiutepec, Morelos: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales– Comisión Nacional del Agua–IMTA.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] (2013). *Extractor rápido de información climática (ERIC III)*. Versión 3.2. 1 Cd. Jiutepec, Morelos, México: IMTA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva-Díaz, J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93-105. doi: 10.21829/myb.2013.191349
- Kwak, J., Kim, S., Kim, G., Singh, V. P., Park, J., & Kim, H. S. (2016). Bivariate drought analysis using streamflow reconstruction with tree ring indices in the Sacramento Basin, California, USA. *Water*, 8(4). doi: 10.3390/w8040122
- Lara, A., Villalba, R., & Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change*, 86(3-4), 331-356. doi: 10.1007/s10584-007-9287-7
- Magaña, V. (1999). Los impactos de El Niño en México. In *Los Impactos de El Niño en México*: México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magaña, V., Vázquez, J., Pérez, J., & Pérez, J. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2
- Meko, D. M., & Woodhouse, C. A. (2005). Tree-ring footprint of joint hydrologic drought in Sacramento and Upper Colorado river basins, western USA. *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 196-213. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.11.003
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188. doi: 10.1175/2009JCLI3080.1
- Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W., & Corrales-Barraza, G. (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 7-22. doi: 10.21829/myb.2017.2311482
- Mundo, I. A., Masiokas, M. H., Villalba, R., Morales, M. S., Neukom, R., Le Quesne, C., Urrutia, R. B. & Lara, A. (2012). Multi-century tree-ring based reconstruction of the Neuquén River streamflow, northern Patagonia, Argentina. *Climate of the Past*, 8(2), 815- 829. doi: 10.5194/cp-8-815-2012
- Muñoz, A. A., González-Reyes, A., Lara, A., Sauchyn, D., Christie, D., Puchi, P., . . . , & Mundo, I. (2016). Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35°S-42°S) during the last 400 years inferred from tree-ring records. *Climate Dynamics*, 47(12), 4051-4066. doi: 10.1007/s00382-016-3068-9
- Murphy, J. B., Keppie, J. D., Nance, R. D., Miller, B. V., Dostal, J., Middleton, M., & Storey, C. D. (2006). Geochemistry and U-Pb protolith ages of eclogitic rocks of the Asis Lithodeme, Piaxtla Suite, Acatlán Complex, southern Mexico: tectonothermal activity along the southern margin of the Rheic Ocean. *Journal of the Geological Society*, 163(4), 683-695. doi: 10.1144/0016-764905-108
- Nicholas, R. E., & Battisti, D. S. (2008). Drought recurrence and seasonal rainfall prediction in the Rio Yaqui basin, Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(4), 991-1005. doi: 10.1175/2007JAMC1575.1
- National Oceanic and Atmospheric [NOAA] (2020). National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering/>
- Pompa-García, M., Rodríguez-Flores, F. D. J., Cerano-Paredes, J., Valdez-Cepeda, R. D., & Roig-Junent, F. A. (2013). Effect of monthly precipitation on the radial growth of *Pseudotsuga menziesii*



- in northern Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 8(17), 1636 -1640. doi: 10.5897/AJAR12.2074
- Rahmstorf, S., & Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(44), 17905-17909. doi: 10.1073/pnas.1101766108
- Ruiz-Campos, G., Camarena-Rosales, F., Varela-Romero, A., Sanchez-Gonzales, S., & De La Rosa-Velez, J. (2003). Morphometric variation of wild trout populations from orthwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13(1), 91-110. doi: 10.1023/a:1026367113735
- Sánchez N., R. & Barrios O., E. (2011). Caudal ecológico: propuesta metodológica. Ejemplo de caso Río San Pedro mezquital, Marismas Nacionales, Nayarit. Ambiente, Biología, Sociedad, Manejo y Legislación de la Zona Costera Mexicana. En De la Lanza, G. E., & Hernández, P. S. (Comp.). *Ambiente, biología, sociedad, manejo y Legislación de Sistemas Costeros Mexicanos* (pp. 358-386). Mexico: UNAM.
- Santiago-Reyes, J., Etter, J., & Kristen, M. (2015). *Sedum piaxtlaense* (Crassulaceae), a new species from Durango, México. *Haseltonia*, 20, 58-63. doi: 10.2985/026.018.0107
- Santillán-Hernández, M., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., & Capó-Arteaga, M. Á. (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinaster* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques*, 16(1), 17- 30. doi: 10.21829/myb.2010.1611177
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., & Stahle, D. W. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera*, 22(1), 1-31.
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Diaz, J. V., Heim, R. R., Jr., Fye, F. K., Paredes, J. C., & Cleaveland, M. K. (2012). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, 39(6), 1431-1446. doi: 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., ... & Szejner, P. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Stahle, D. W., Cleaveland, M., Therrell, M., Gay, D., D'arrigo, R., Krusic, P., Dunbar, R. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2
- Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (1992). Reconstruction and analysis of spring rainfall over the southeastern US for the past 1000 years. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, 1520-1526. doi: 10.1175/1520-0477(1992)073<1520:RAAOSR>2.0.CO;2
- Stahle, D. W., Diaz, J. V., Burnette, D. J., Paredes, J., Heim, R., Fye, F. K., ... & Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(5). doi: 10.1029/2010GL046472
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Torbenson, M. C. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Torbenson, M. C. A., Stahle, D. W., Howard, J. M., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Cook, E. R., & Griffin, D. (2019). Multidecadal modulation of the ENSO teleconnection to precipitation and tree growth over subtropical North America. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34, 886-900. doi: 10.1029/2018PA003510
- Van Oldenborgh, G., Te Raa, L., Dijkstra, H., & Philip, S. (2009). Frequency-or amplitude- dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5(3), 293-301.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., Castruita-Esparza, L. U., Cervantes-Martínez, R., ... & Martínez-Sifuentes, A. R. (2014). Cinco siglos de historia dendrocronológica de los ahuehuertos (*Taxodium mucronatum* Ten.) del parque El Contador, San Salvador Atenco, Estado de México. *Agrociencia*, 48(7), 725- 737.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Vázquez-Selem, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., ... & Ruiz-Corral, J. A. (2014). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5-14. doi: 10.14350/ig.42003
- Villanueva-Díaz, J., Luckman, B. H., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Cerano-Paredes, J., ... & Jasso-Ibarra, R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, 22(3), 215-223. doi: 10.1016/j.dendro.2005.04.005
- Villanueva D., J., Cerano P., J., Rosales M., S., Arrocena L., J. C., Stahle, D., Ruiz C., J. A., & Martínez S., A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(10), 1897-1912.

- Villanueva Díaz, J., Paredes, J. C., Fulé, P. Z., Montaño, C. C., Selem, L. V., Yocom, L. L., & Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(87), 141-153. dx.doi: 10.14350/rig.44485
- Villanueva, J., A. Gómez, J. Cerano, S. Rosales, J. Estrada, L.U. Castruita, y A.R. Martínez. (2017). La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII(3), 55-74.
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201-213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- Wilson, R., Cook, E., D'Arrigo, R., Riedwyl, N., Evans, M. N., Tudhope, A., & Allan, R. (2010). Reconstructing ENSO: the influence of method, proxy data, climate forcing and teleconnections. *Journal of Quaternary Science*, 25(1), 62-78. doi: 10.1002/jqs.1297
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074-1087. doi: 10.1002/joc.2336
- Woodhouse, C. A. (2001). A tree-ring reconstruction of streamflow for the Colorado Front Range. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(3), 561-569. doi: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05493.x
- Woodhouse, C. A., Gray, S. T., & Meko, D. M. (2006). Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 42(5), W05415. doi: 10.1029/2005wr004455
- Woodhouse, C. A., Meko, D. M., MacDonald, G. M., Stahle, D. W., & Cook, E. R. (2010). A 1,200-year perspective of 21st century drought in southwestern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21283-21288. doi: 10.1073/pnas.0911197107
- Woodhouse, C. A., Stahle, D. W., & Villanueva Diaz, J. (2012). Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over the past 500 years. *Climate Research*, 51(2), 147. doi: 10.3354/cr01059
- Wright, P. B. (1979). Persistence of rainfall anomalies in the central Pacific. *Nature*, 277(5695), 371-374. doi: 10.1038/277371a0

ANEXO 1. Precipitación mensual media para las estaciones meteorológicas del área de estudio.

Mes	Estación					
	Charco Verde	Huahuapan	Truchas	Peña de Águila	San Dímas	Salto
Enero	47.5	60.2	73.9	15.8	44.8	52.7
Febrero	16.3	16.7	32.3	5.3	17.2	22.1
Marzo	16.0	12.1	20.7	3.3	19.3	14.0
Abril	8.8	12.6	10.9	2.4	4.1	14.1
Mayo	15.3	16.7	27.5	10.8	6.7	32.4
Junio	91.6	96.8	134.3	68.7	91.2	147.1
Julio	184.8	203.5	271.1	121.3	230.5	206.1
Agosto	173.7	166.7	247.8	131.0	174.6	180.3
Septiembre	128.1	145.6	186.0	111.3	152.1	146.8
Octubre	56.1	47.1	73.8	32.6	53.2	60.8
Noviembre	22.2	19.9	42.1	13.9	29.3	39.2
Diciembre	49.2	46.2	103.7	13.8	54.3	65.8
Anual	809.5	844.0	1224.0	530.1	877.1	981.3



Manuscrito recibido el 20 de octubre de 2017

Aceptado el 28 de febrero de 2020

Publicado el 30 de octubre de 2020

Este documento se debe citar como:

Villanueva D., J., Gómez G. A., Estrada Á., J., & Martínez S., A. R. (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. doi: 10.21829/myb.2020.2631653



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.