



Quinto  
Congreso Nacional  
de Riego y Drenaje  
**COMEII-AURPAES 2019**

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



**Artículo: COMEII-19039**

*Mazatlán, Sin., del 18 al 20*

*de septiembre de 2019*

## **RECONSTRUCCIÓN DE SEQUÍAS Y ASOCIACIÓN CLIMÁTICA EN LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS, CHIHUAHUA**

**Aldo Rafael Martínez-Sifuentes<sup>1\*</sup>; José Villanueva-Díaz<sup>2</sup>; Juan Estrada-Ávalos<sup>2</sup>; Luis Ubaldo Castruita-Esparza<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Agricultura y Zootecnia. Km 30 Carretera Gómez Palacio a Tlahualilo, C.P. 35000, Gómez Palacio, Durango, México.

[im\\_aldo09@hotmail.com](mailto:im_aldo09@hotmail.com) - 8717568666 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera. Km. 6.5 Margen Derecha Canal de Sacramento, C.P. 35150 Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km. 2.5 Carretera Delicias a Rosales, C.P. 33000, Delicias, Chihuahua, México.

### **Resumen**

Las sequías son un fenómeno climático con repercusiones a gran escala que impactan de manera negativa las actividades productivas y ecológicas de una región, y su conocimiento histórico permite un manejo óptimo de los recursos naturales cuando estas pueden preverse a través de análisis de frecuencias. El objetivo del presente estudio fue generar una reconstrucción de sequías en la cuenca del río Conchos en Chihuahua a través del índice SPEI mediante anillos de árboles y compararla con el índice de vegetación NDVI, así como determinar frecuencias con análisis de densidad espectral y de ondeleta, de igual manera, generar una asociación climática regional de precipitación y temperatura con datos asimilados y los índices de ancho de anillo, y con la reconstrucción realizada. La asociación más significativa ( $r=0.82$ ,  $p<0.05$ ) fue entre la precipitación acumulada de noviembre del año previo a junio del año actual con la madera temprana, y para temperatura la mayor asociación fue de enero a julio con madera temprana ( $r=-0.81$ ,  $p<0.05$ ). La reconstrucción del índice sequías SPEI fue de 1775 a 2017 (243 años), donde resaltan los periodos secos de 1801, 1805, 1860, 1892-1894, 1953-1957, 1980, 1996, 1998-2000, 2002-2003 y 2011-2012. La relación entre la reconstrucción de SPEI y los datos de NDVI fue significativa ( $r=0.63$ ,  $p<0.01$ ).

**Palabras claves:** Anillos de árboles, NDVI, Precipitación, SPEI, temperatura.



## Introducción

Los eventos hidrológicos extremos como avenidas y sequías extremas, son factores que por su impacto social, económico y ambiental se ubican en altas posiciones de desastres de índole climático (Tirivarombo *et al.*, 2018). Las sequías son una de los más grandes problemas que compromete la seguridad y sobrevivencia humana a nivel mundial (Sharma *et al.*, 2009). En este sentido, es complicado definir una sequía, por el hecho de que son espacial y temporalmente variables, inciden de manera diferente a nivel regional, y es difícil precisar su inicio y final, magnitud, duración y extensión de impacto (Quiring y Papakryiakou 2003). Debido a la creciente demanda de recurso hídrico para satisfacer las necesidades urbanas, agrícolas y naturales, a causa de aumentos en temperatura y escasas en precipitación, se ha incrementado el estudio de sequías en zonas áridas de México (Seager *et al.*, 2014, Campos-Aranda 2018, Perdigón-Morales *et al.*, 2018) y el mundo (Vicente-Serrano *et al.*, 2010b; Senatore *et al.*, 2019). Un aspecto importante que caracteriza a las sequías, es su naturaleza multiescalar, es decir, que se presenta a múltiples escalas de tiempo y se origina por retrasos en los sistemas naturales y antrópicos de aprovechamiento (Lacruz *et al.*, 2010); el comportamiento a escala de tiempo define el tipo de sequía, siendo meteorológica (a un mes), agrícola (tres a seis meses) e hidrológica (escala a 12 meses) (Homdee *et al.*, 2016).

Actualmente existen diversos índices de sequías (Heim 2002), sin embargo, los más comunes son el Índice de Sequía de Severidad de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Palmer 1968), y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) (Mckee *et al.*, 1993); donde el PDSI constituye un balance hidrológico que considera parámetros como precipitación, escurrimiento, humedad y evaporación, en contraposición al SPI, que solamente emplea como insumo a la precipitación (Vicente-Serrano *et al.*, 2010a). Otro de los índices de sequía es el Índice Estandarizado de Precipitación-Evaporación (SPEI, por sus siglas en inglés) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010a), el cual es un índice multiescalar y sensitivo a las alteraciones históricas de precipitación y temperatura, y tiene la característica de identificar sequías a diferente escala de tiempo, conforme a las tendencias producidas por cambio climático en una región (Vicente-Serrano *et al.*, 2010b).

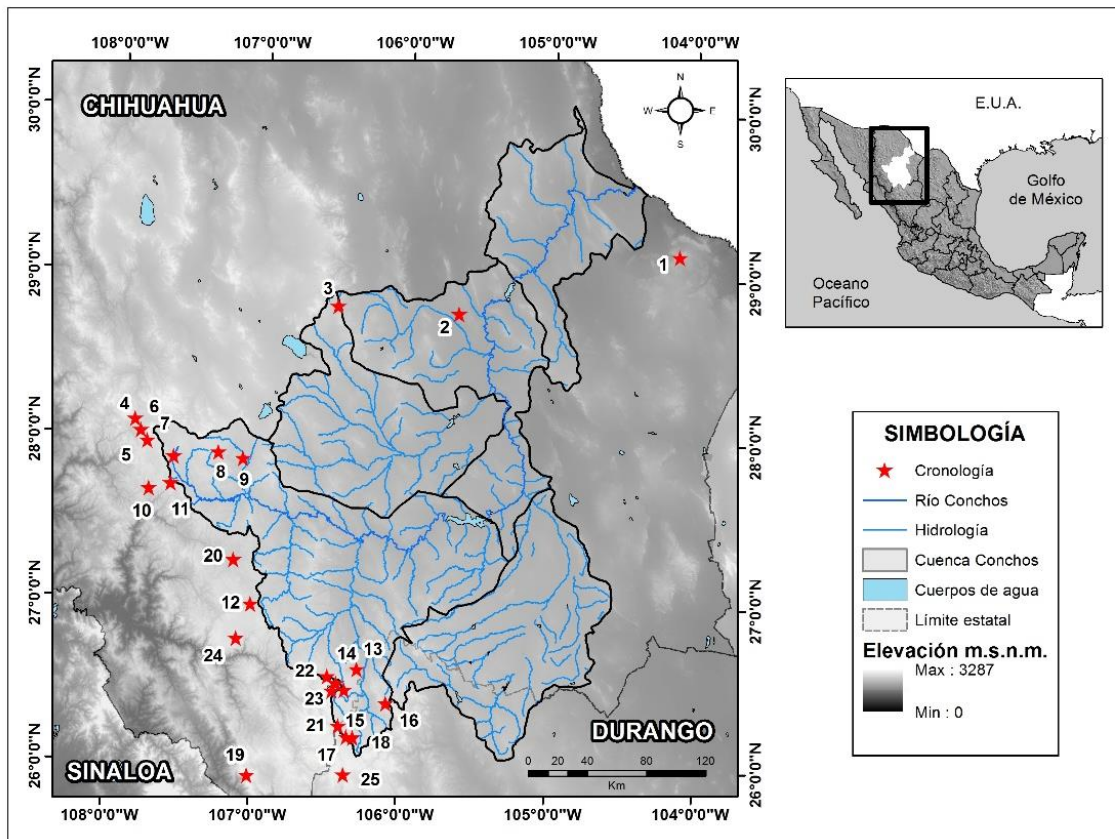
El norte de México es una región sensitiva en ámbito de sequías, con una tendencia en el aumento de temperatura y disminución de precipitación (IPCC 2014); zona donde queda enclavada la cuenca del Río Conchos (CRC), la cual atraviesa por una serie de problemas ambientales con impacto transnacional (Linares 2004); aquí también muestra una influencia significativa la tele-conexión del fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Stahle *et al.*, 1998), particularmente la fase cálida de este fenómeno en su fase Niño (Woodhouse *et al.*, 2012).

Por lo antes descrito, es importante generar estudios multiescales de sequías, con la finalidad de caracterizar a fondo la variabilidad de este fenómeno de amplio impacto. El objetivo del presente estudio fue generar una reconstrucción histórica del índice SPEI mediante anillos de crecimiento de coníferas, detectar eventos de gran magnitud previos a registros instrumentales, y su asociación tanto con variables climáticas de precipitación y temperatura procedentes de datos asimilados, e índice NDVI del satélite MODIS, y detección de ciclos mediante análisis de densidad espectral y de ondeleta.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El presente estudio se realizó en la cuenca del Río Conchos en el estado de Chihuahua (Figura 1), cuyas coordenadas extremas son 26°05' a 29°55' latitud norte y 104°20' a 107°55' longitud oeste, una superficie de 68,387 km<sup>2</sup> y un gradiente de elevación desde 772 hasta 3282 m.s.n.m. (INEGI 2013). El clima está conformado por cuatro tipos, muy árido, árido, semiárido y sub-húmedo (García 1998). La temperatura media anual fluctúa en el rango de 8°C a 18°C con una precipitación media anual de 419 mm (CONABIO 2001).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la cuenca del Río Conchos y distribución espacial de series dendrocronológicas.

### Series

Las series dendrocronológicas se obtuvieron del portal de base de datos internacional de anillos de árboles, conformada de 25 series con información de madera temprana, madera tardía y de anillo total en sus tres versiones, estándar, residual y arstan (Cuadro 1) (NOAA 2003).

**Cuadro 1.** Cronologías analizadas en la cuenca del río Conchos en el estado de Chihuahua.

Núm.	sitio	Clave	Extensión (años)	Especie	Tipo de cronología <sup>1</sup>
1	Sierra Rica	SRI	1636-2015 (380)	<i>Pinus cembroides</i>	RW
2	Coscomate	COS	1561-2014 (454)	<i>Pinus cembroides</i>	RW
3	Majalca	MAJ	1656-2103 (358)	<i>Pinus cembroides</i>	RW, EW, LW
4	Bocoyna	ENA	1847-2010 (164)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
5	Basagochi	CAC	1809-2013 (205)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
6	Ranchito San Juanito	RAN	1770-2013 (244)	<i>Picea chihuahuana</i>	RW, EW, LW
7	Baburiachi	BAB	1889-2012 (124)	<i>Pinus arizonica</i>	RW, EW, LW
8	Pasigochi	EPA	1776-2012 (237)	<i>Pinus cembroides</i>	RW
9	Ejido La Unión	CAC	1849-2013 (165)	<i>Pinus cembroides</i>	RW
10	Barranca del Cobre	COB	1745-2014 (270)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
11	Arareco	ARA	1874-2014 (141)	<i>Pinus arizonica</i>	RW, EW, LW
12	El Tule Gpe. Y Calvo	ELT	1830-2013 (184)	<i>Pinus durangensis</i>	RW, EW, LW
13	Cabeza de Venado	CAV	1824-2011 (188)	<i>Pinus cembroides</i>	RW
14	Cebollas	CBL	1612-2011 (400)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
15	Arnulfa	ARN	1612-2011 (400)	<i>Picea chihuahuana</i>	RW, EW, LW
16	Cerro Barajas	CBA	1612-2006 (395)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
17	Chiqueros	CHI	1431-2005 (575)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
18	Río Verde	RVE	1810-2015 (206)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
19	Cerro Mohinora	MOH	1657-2005 (349)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
20	Guachochi	GUA	1806-2017 (212)	<i>Pinus lumholtzii</i>	RW, EW, LW
21	Los Pilares	LPI	1725-2015 (291)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
22	El Quelite	QUE	1750-2015 (266)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	RW, EW, LW
23	Unidad de Producción de Germoplasma	UPG	1760-2015 (256)	<i>Pinus arizonica</i>	RW, EW, LW
24	Sinforosa	SIN	1887-2016 (130)	<i>Pinus leiophylla</i>	RW, EW, LW
25	Cocono	COC	1449-2002 (554)	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	EW, LW

### Variables climáticas, índice de sequía y de vegetación

En este estudio se emplearon datos procedentes del modelo North American Land Data Assimilation System v002 (NLDAS-2), dicha base de datos almacena información climática generada a partir de la integración de datos observados y modelado de la superficie terrestre (Mocko 2012). El modelo NLDAS-2 es un trabajo en conjunto de instituciones de carácter internacional, cuyo objetivo radica en la obtención de variables ambientales para comprender los procesos naturales a nivel espacial (Xia et al., 2012), esta información incluye datos horarios acumulados y mensuales a partir de 1979 a la fecha con resolución espacial de 0.125°. Para el desarrollo del estudio, se obtuvo información a nivel cuenca de la precipitación media mensual en mm mes-1 y de temperatura media mensual en °C (Figura 2).

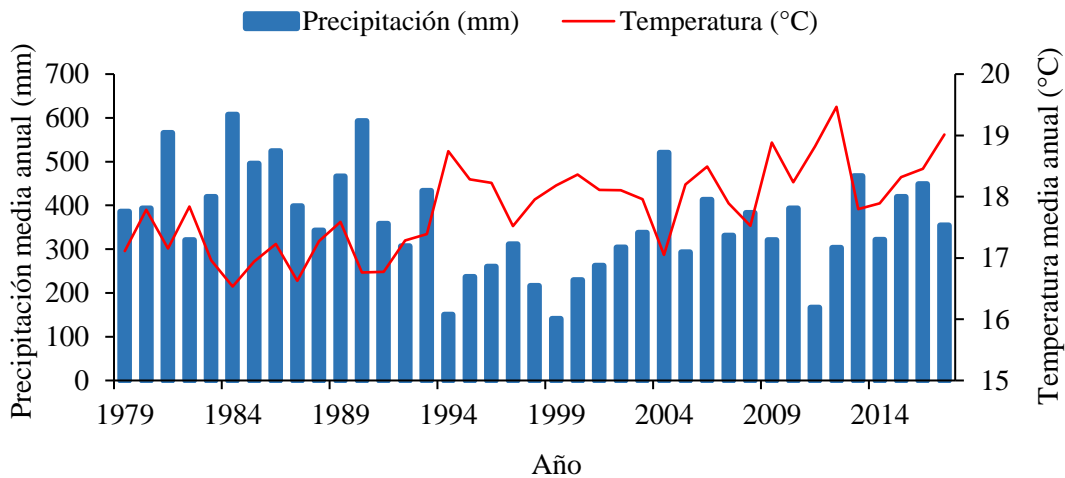


Figura 2. Climograma de precipitación y temperatura anual a nivel cuenca.

Se empleó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) de la serie de tiempo de eMODIS, basado en el Espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS, por sus siglas en inglés), el cual consiste en una composición de intervalos de 16 días a una resolución espacial de 250 m, generado por el Centro de Observación y Ciencias de la Tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos (EROS-USGS, por sus siglas en inglés) con resolución temporal desde el año 2000 a la fecha (Jenkerson *et al.*, 2010). Para incrementar la actividad fotosintética y eliminar las interferencias atmosféricas, se realizó la composición del valor máximo (MVC) (Hope *et al.*, 2003, Stow *et al.*, 2004). La información se extrajo del formato raster de procedencia, de acuerdo a georreferenciación de las series dendrocronológicas para trabajarse en base de datos. Los valores de SPEI se descargaron del monitor global de sequías de acceso libre en el sitio <http://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=2#year=2018>, se trabajó a escala temporal de tres meses, ya que a esta resolución se establece la asociación a nivel estacional y anual (Serrano-Barrios *et al.*, 2016).

### Análisis estadísticos

Las series se analizaron mediante Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) por banda y por versión, con la finalidad de obtener una variabilidad

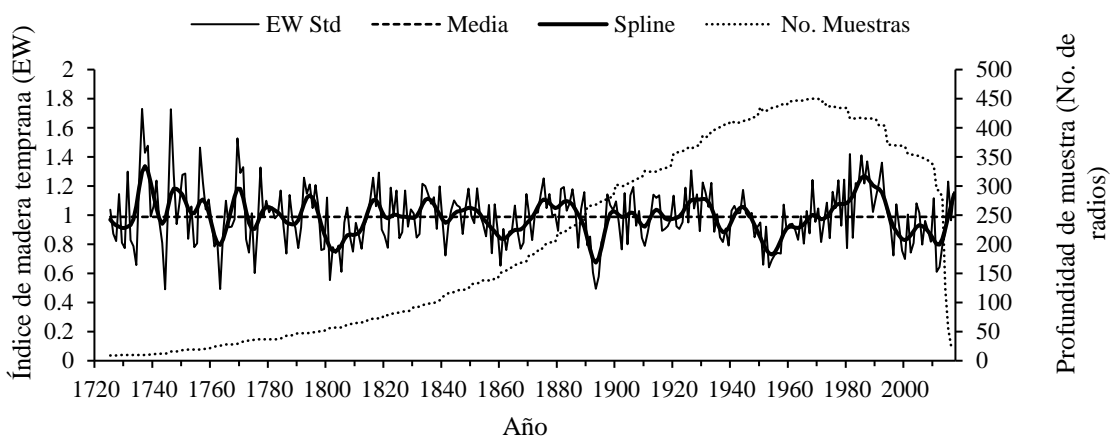
común y maximizar la señal de acuerdo a la varianza expresada por componente (Hair *et al.*, 1999); este análisis solamente se toma como referencia para determinar variabilidad común, ya que no se emplearán los índices obtenidos del PCA, únicamente las series dendrocronológicas agrupadas. La respuesta entre las variables climáticas y el índice SPEI con las cronologías analizadas, se desarrolló mediante correlación de Pearson para lapsos estacionales, acumulados y anuales. Para el periodo con mayor correlación significativa ( $p < 0.05$ ), se generó una ecuación de regresión que derivará en una función de transferencia, la cual se validó de acuerdo a sub-periodos conformados entre la mitad de registros observados y la mitad de datos reconstruidos (Cook y Kairiukstis 1990), mediante la subrutina “*verify*” de la librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL).

Así mismo, se empleó el índice NDVI para verificar la reconstrucción de SPEI entre el periodo común de los indicadores, ya que el NDVI está fuertemente ligado a la producción forestal y variaciones climáticas (Simová y Storch 2017), y se considera un parámetro para evaluar condiciones de sequía (Karnieli *et al.*, 2010).

## Resultados y Discusión

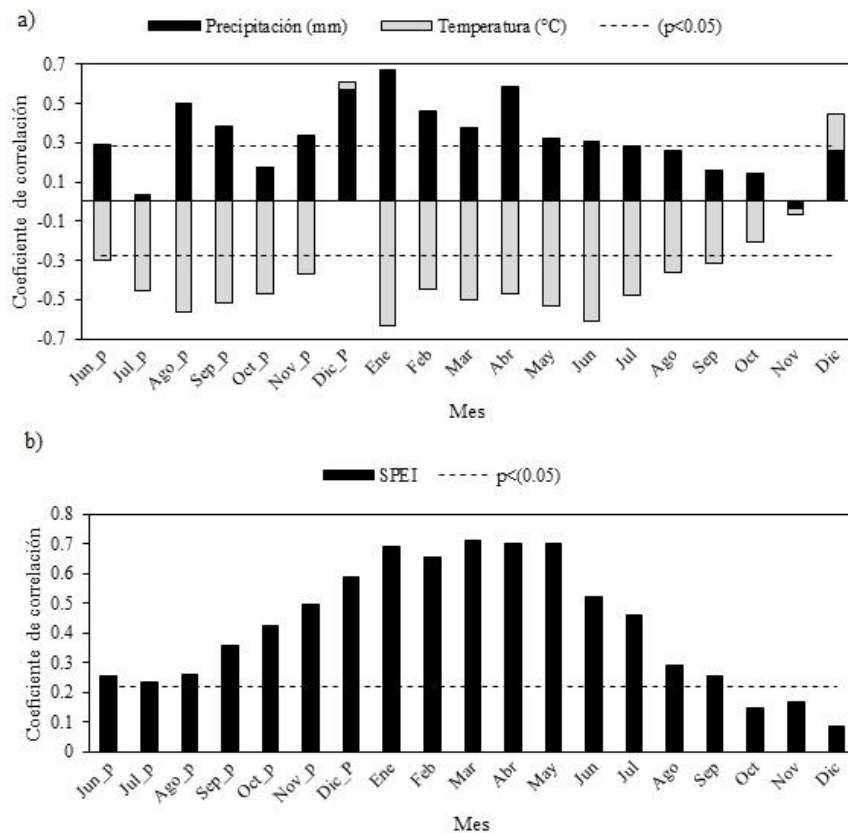
### Análisis por Componentes Principales y análisis de respuesta

El PCA ubicó al PC1 como el que representa la mayor varianza (57.07%), en el que agrupa a las cronologías de madera temprana versión estándar de los sitios ARA, BAB, COB, CAC, ELT, GUA, LPI, MAJ y RAN, donde el resto de las cronologías se distribuyen en los demás componentes. La cronología del PC1 se extiende de 1725 a 2017 (293 años), pero se redujo al período 1775-2017 (243 años), donde la Señal Expresada de la Población (EPS, siglas en inglés) es superior a 0.85 con al menos 9 radios (Figura 3). Las series dendrocronológicas de anillo total (RW, por sus siglas en inglés) y de madera tardía (LW, siglas en inglés), se descartaron del análisis por mostrar una varianza comparativamente menor a la cronología EW.



**Figura 3.** Cronología regional de madera temprana versión estándar de la cuenca del Río Conchos, con una curva flexible decenal (*spline*) para resaltar eventos de baja frecuencia.

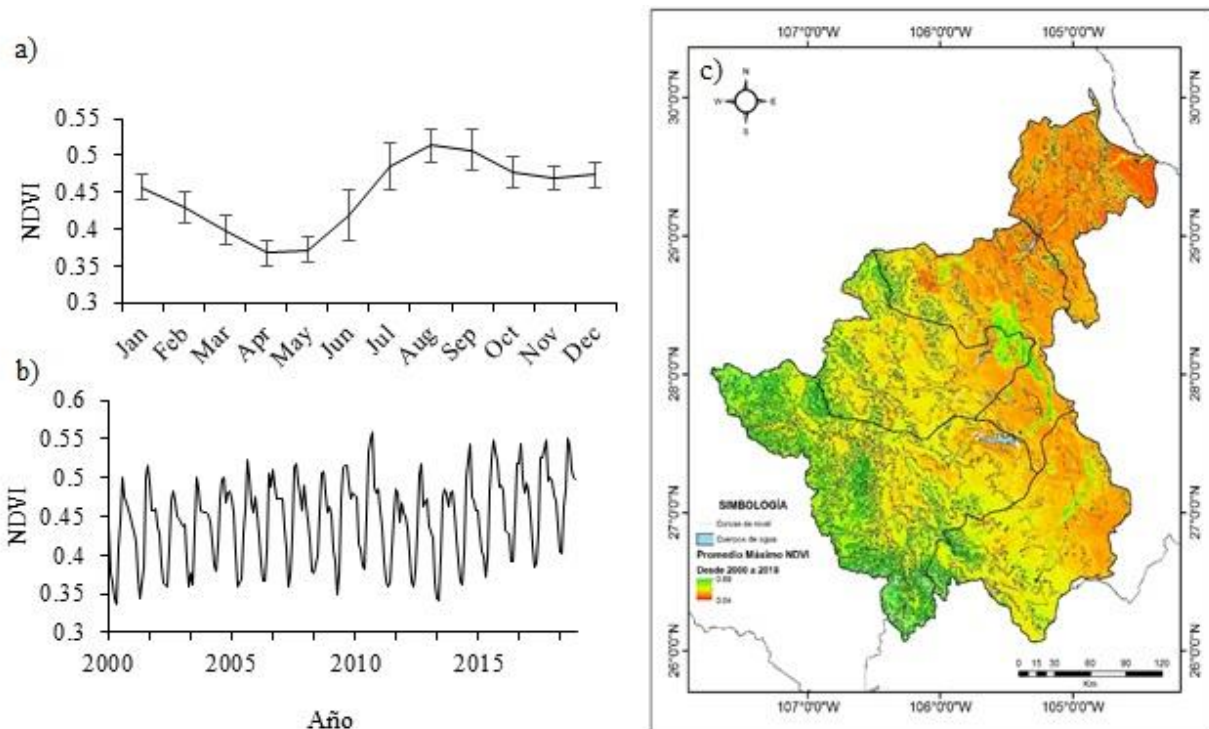
El análisis de correlación de Pearson entre la serie integrada de madera temprana y la precipitación mensual señala diversos periodos significativos (95 % de significancia), entre ellos, destaca el período estacional enero-julio con correlaciones desde ( $r=0.28$ ) para julio, hasta ( $r=0.67$ ) para el mes de enero, mostrando una alta correlación ( $r=0.82$ ) en el período acumulado de noviembre del año previo a junio del año actual de crecimiento (Figura 4a). Las correlaciones con temperatura mensual, en su mayoría fueron negativas tanto en el año biológico, como en periodos acumulados previos a éste, por ejemplo, se encontraron correlaciones (95 % significancia) en los meses de enero ( $r=-0.63$ ), marzo ( $r=-0.50$ ), mayo ( $r=-0.53$ ), y junio ( $r=-0.60$ ), con la mayor asociación en enero. Por lo que respecta al año previo, todos los valores fueron significativos, exceptuando diciembre, aunque el período con mayor correlación fue el promedio de enero a julio del año biológico ( $r=-0.81$ ). El SPEI es un indicador del comportamiento de las sequías, donde las especies forestales están altamente influenciadas por las variables de precipitación y temperatura que conforman dicho índice, por lo cual, se presentaron altas correlaciones (95 % significancia) en casi todos los meses analizados, excepto octubre, noviembre y diciembre del año biológico, la correlación más alta ( $r=0.71$ ) se presentó para marzo, seguida por abril y mayo ( $r=0.69$ ); mientras que el periodo enero-diciembre presentó una correlación ( $r=0.80$ ), por lo tanto, este periodo sirvió para generar el análisis de reconstrucción del SPEI, el cual representa el comportamiento anual de las sequías en la CRC (Figura 4b).



**Figura 4.** Correlación entre cronología combinada (a) precipitación media mensual (barras negras) y temperatura media mensual (barras grises), (b) índice SPEI a nivel mensual, las líneas punteadas es el nivel de significancia al 95 %.

### Análisis de tendencia de NDVI

Una vez que se extrajo la información raster de las capas bimestrales de NDVI, se observó la variabilidad estacional en el comportamiento desde el año 2000, donde los meses agosto y septiembre muestran los valores más elevados de NDVI, periodo relacionado a los mayores volúmenes de escurrimiento derivados de altas precipitaciones de la estación de verano ocasionados por fenómenos atmosféricos de circulación global (Figura 5a). La tendencia interanual presenta patrones similares, con un valor mínimo histórico de 0.33 para el año 2000 y un máximo histórico de 0.55 para el año 2010 (Figura 5b). En la Figura 5c, se muestra el valor máximo de NDVI para el periodo disponible en el satélite MODIS (2000-2018), se aprecia que históricamente los valores más altos de este índice se ubican en elevaciones mayores a los 2,000 m.s.n.m.; los rangos de (NDVI<0.1) ocupan una superficie de 70.68 km<sup>2</sup>, que corresponden a zonas urbanas, rocas, arena o nieve, el rango de (0.1<NDVI<0.2) ocupa 8,933 km<sup>2</sup> que es considerado como vegetación ligera, (0.2<NDVI<0.4) comprende 29,124 km<sup>2</sup> de vegetación media, y valores de (NDVI>0.4) que indican vegetación alta de bosques templados muestra una superficie de 5,587 km<sup>2</sup>, el área restante incluye a los ríos y cuerpos de agua.



**Figura 5.** Valores de NDVI obtenidos de MODIS, (a) mensuales desde 2000 a 2018, con desviación estándar, (b) serie temporal mensual y (c) NDVI promedio máximo a 250 m por pixel.

### Reconstrucción de SPEI

Basado en los resultados estadísticos entre la serie dendrocronológica combinada de EW y el índice SPEI, se reconstruyó el periodo anual (enero-diciembre) a escala de tres meses, la ecuación lineal de transferencia del modelo del periodo de 1951-2009 es:

$$Y = 1.8615 * X - 1.8069 \quad (1)$$

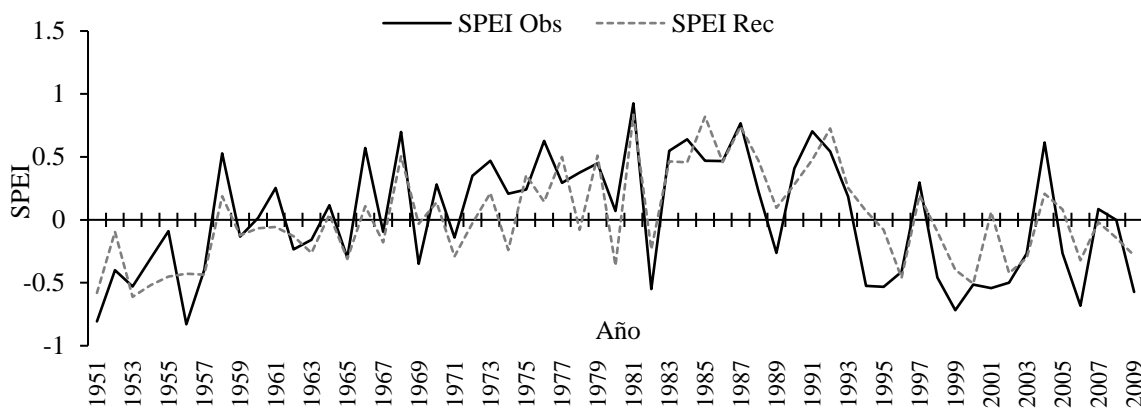


Donde, Y es el valor de SPEI anual reconstruido, y X es el índice de madera temprana, este modelo explica el 64.1% del total de la varianza para el periodo común; el análisis por sub-periodos de verificación del modelo, presentó estadísticos adecuados para efectos de reconstrucción (Cuadro 2 y Figura 6).

**Cuadro 2.** Estadísticos de verificación del modelo de reconstrucción anual de SPEI a escala de tres meses.

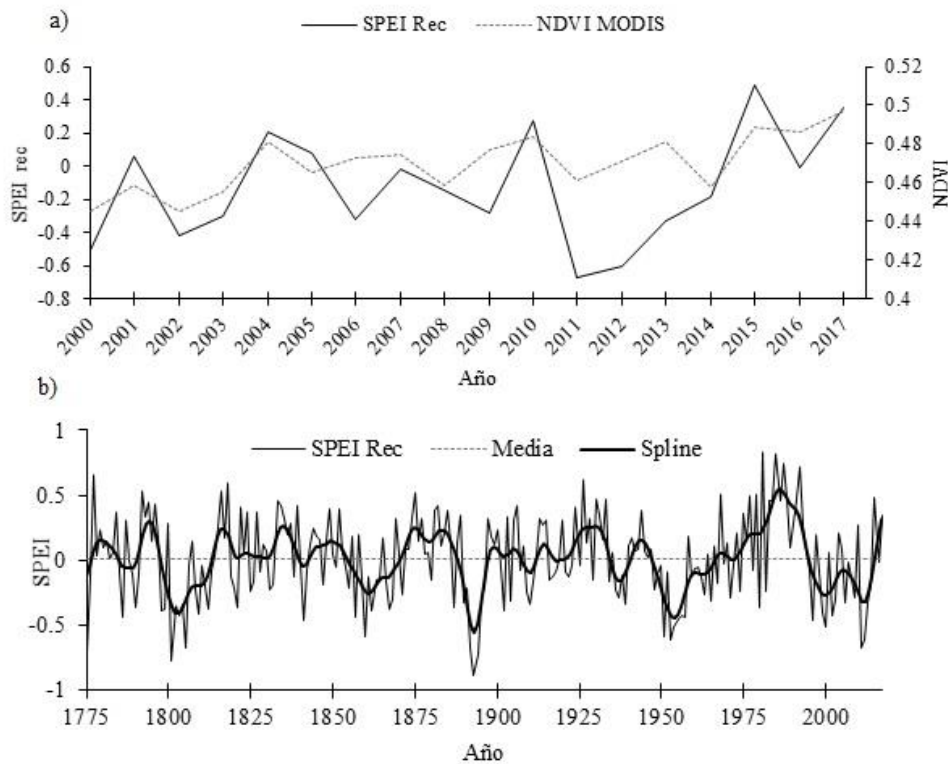
Periodo	Correlación de Pearson <sup>1</sup>	Reducción del error <sup>2</sup>	Valor de "t" <sup>3</sup>	Prueba de signos <sup>4</sup>	Primera diferencia negativa <sup>5</sup>
1951-1980	0.78*	0.54*	3.47*	5*	6*
1981-2009	0.87*	0.70*	5.78*	5*	7*

<sup>1</sup>Medida de la relación entre dos variables aleatorias cuantitativas y es independiente de la escala en las que estén medidas; <sup>2</sup>No existe una prueba de significancia para este estadístico, pero cualquier resultado positivo indica que la reconstrucción contribuye con información paleoclimática única (Fritts 1976); <sup>3</sup>Comparación de las medias de los datos observados y reconstruidos (Steel y Torrie 1980). La no diferencia entre datos es el resultado buscado; <sup>4</sup>Relaciona el número de coincidencias y desacuerdos entre los datos observados y reconstruidos y aplica un estadístico de asociación entre ambas, conocido como prueba de "t" (Fritts 1976); <sup>5</sup>Primera diferencia entre los datos observados y reconstruidos (t- t-1), la transformación remueve tendencias que pueden afectar el coeficiente de correlación (Fritts 1976); \* Significativo (p<0.05); NS: No significativo.



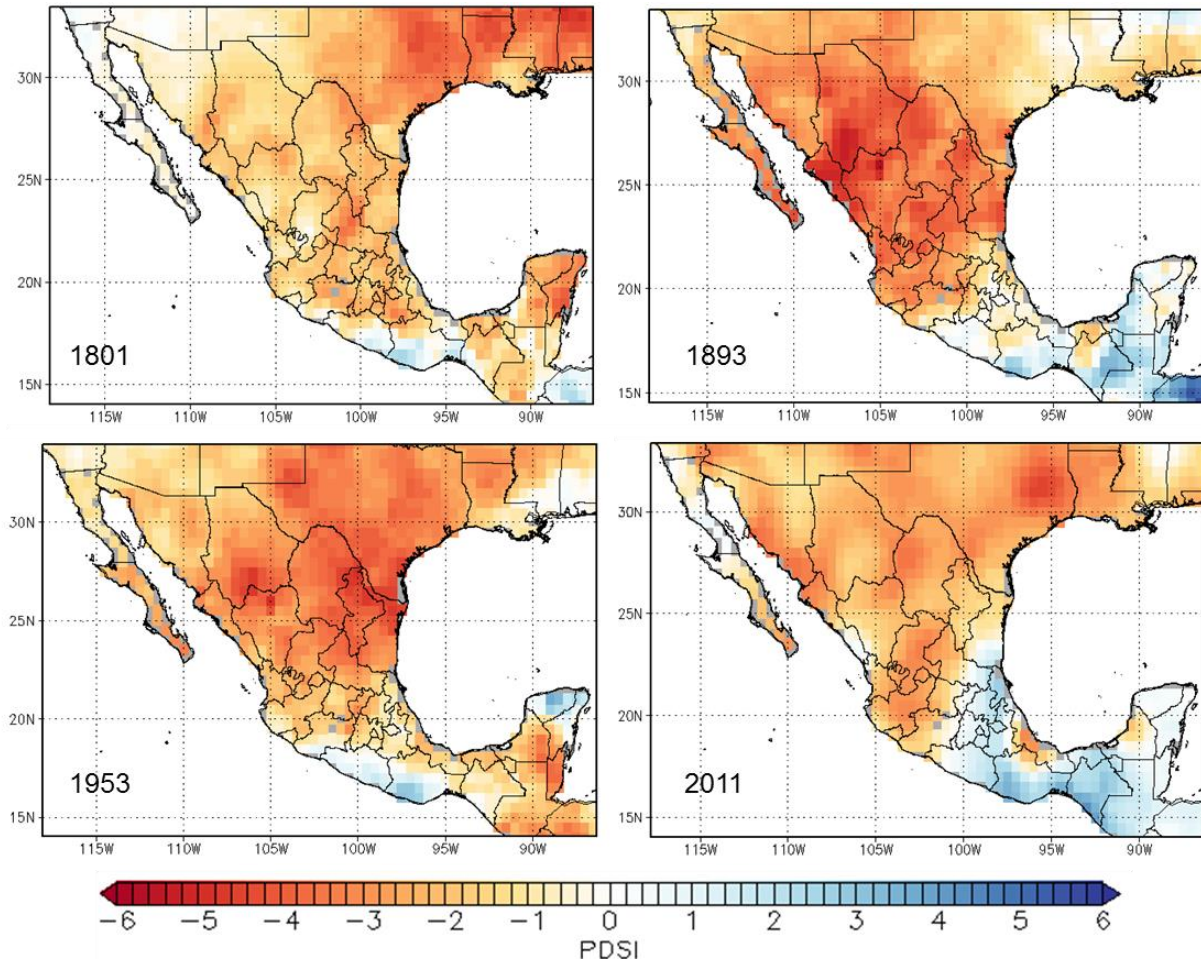
**Figura 6.** Comparación del periodo anual entre el SPEI observado y el SPEI reconstruido mediante la ecuación de transferencia para el periodo de 1951 a 2009.

La reconstrucción del SPEI (escala de tres meses) del periodo anual, se extiende desde 1775 hasta 2017 (243 años), presentándose una fluctuación muy evidente a través del periodo total, donde se observan eventos extremos de sequías características del norte de México como: de 1801, 1805, 1860, 1892-1894, 1953-1957, 1980, 1996, 1998-2000, 2002-2003 y 2011-2012 ubicándose por debajo de las condiciones medias que se reflejan en los anillos de árboles y se transfieren al SPEI por medio de los factores de precipitación y temperatura. Se ajustó una curva flexible “*spline*” decenal para resaltar los eventos de baja frecuencia (Figura 7a). El NDVI obtenido de MODIS, comparado con la información generada del modelo reconstruido de SPEI, para el periodo común (2000-2017), presenta una correlación significativa ( $r=0.63$ ,  $n=18$ ,  $p<0.01$ ), lo cual corrobora la relación de estos indicadores y validación de la reconstrucción de SPEI mediante información espacial de NDVI (Figura 7b).



**Figura 7.** (a) reconstrucción de SPEI con extensión temporal de 243 años, (b) comparación de los valores reconstruidos de SPEI y NDVI del periodo común.

El Atlas de sequías muestra la distribución espacial de las condiciones más extremas muy por debajo de las condiciones normales de sequía obtenidas de la reconstrucción del SPEI. Los años de 1801, 1893, 1953 y 2011, señalan el comportamiento del PDSI JJA, donde se detecta que estos años presentaron condiciones de sequía extrema en el centro norte de México, con rangos de -2 hasta -6 para la región de la cuenca del Río Conchos en el estado de Chihuahua (Figura 8).



**Figura 8.** Atlas Mexicano de Sequías en <http://drought.memphis.edu/MXDA/> , donde se presentan rangos de -6 para condiciones extremas de sequía y 6 para eventos con mayor humedad empleando el PDSI de los meses de junio, julio y agosto.

En el presente estudio se integró de una serie combinada de madera temprana para la CRC con una extensión total de 243 años, donde se demostró que la combinación de diversas cronologías capta de mejor manera la variabilidad climática en una cuenca hidrológica. Villanueva et al., (2017) generaron una reconstrucción hidrológica mediante una serie agrupada por una diversidad de especies de coníferas como *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi*, *Pinus herrerae*, *Pinus leiophylla*, *Pinus lumholtzii* y *Pseudotsuga menziesii*, con una distancia máxima de hasta 62 km entre sitios, siempre y cuando el indicador EPS presente un valor mayor a 0.85 del total de cronologías combinadas (Mérian et al., 2013).

### **Respuesta climática de variables a series dendrocronológicas**

La respuesta de la cronología a la precipitación mensual, indica que la mayor asociación entre ambas variables se presenta en los primeros meses del año y en meses previos al crecimiento; situación que ha sido corroborado con anterioridad con diversas especies de coníferas en el norte de México, donde la respuesta significativa observada



corresponde al período estacional enero-agosto, enero-julio e inclusive octubre-Julio (Villanueva-Díaz et al., 2007, Pompa-García y Jurado 2013, Díaz et al., 2016).

La influencia de la precipitación en el crecimiento del arbolado es evidente debido a las asociaciones positivas con fenómenos climáticos que influyen la precipitación invierno-primavera, así como la de verano, está última la más importante en término de volúmenes producidos (>70%) y que tiene influencia del Monzón de Norteamérica (Hoell et al., 2015). Esta precipitación probablemente no tiene una influencia tan directa en el crecimiento del arbolado, ya que mucha de la precipitación escurre y se presenta además en un período donde gran parte del crecimiento está ya formado, no obstante, esta lluvia es importante, ya que alguna queda almacenada en el suelo y puede ser aprovechada en la siguiente estación de crecimiento (Meko et al., 1996). La asociación más alta entre la cronología y la precipitación se obtuvo para el periodo acumulado noviembre del año previo a junio del año actual ( $r=0.82$ ), lo cual es indicador de que la precipitación invernal (acumulada), es la que más influencia tiene en el crecimiento del arbolado en la CRC, y este periodo estacional está ligado al ENSO en su fase cálida en la Sierra Madre Occidental (Stahle et al., 1998), tal como se muestra en el climograma, las precipitaciones invernales conforman la cuarta parte de la total anual, presentando alta variabilidad interanual y multianual (Cleaveland et al., 2003). Con relación a la temperatura, se han realizado análisis de función de respuesta a temperatura media, mínima y máxima y por consiguiente, reconstrucciones estacionales empleando índices de ancho de anillo como "proxy", y se han encontrado relaciones positivas en diversas partes del mundo (Zuhu et al., 2016, Li et al., 2018). No obstante, en la CRC, la respuesta a la temperatura resultó en correlaciones negativas, lo cual sugiere, que una mayor temperatura, reduce el crecimiento radial de las coníferas (Gennaretti et al., 2014), esta relación negativa, también se ha detectado en estudios dendroclimáticos para México (Villanueva et al., 2018), lo cual se explica a que las altas temperaturas favorecen el incremento de evapotranspiración y alteran el metabolismo del árbol en el proceso de asimilación de fotosintatos (Girardin et al., 2012). Esta relación es de gran significancia a nivel mundial, ya que la temperatura es un componente importante en el cambio climático global, y ha presentado modulaciones en su variabilidad (Medhaug et al., 2017), especialmente en el norte de México, donde los modelos climáticos pronostican incrementos significativos en el futuro (IPCC 2014).

### **Reconstrucción de SPEI y relación con el clima**

La alta correlación entre los índices de madera temprana y el SPEI anual, demuestra el potencial para generar una reconstrucción de sequías, mediante los patrones de crecimiento de los árboles en el norte de México. Este tipo de estudios se han realizado en regiones de China donde se ha reconstruido el periodo estacional abril-junio (Jiang et al., 2016); otro estudio es el de (Bhandari et al., 2019) que reconstruyeron el SPEI para la estación de verano (marzo-mayo) en Nepal, y el estudio de (Zhao et al., 2017) donde asociaron una reconstrucción de SPEI (julio-agosto) con el ENSO. Estos estudios son de gran importancia ya que ayudan a comprender la variabilidad de las condiciones de sequía en una región, de manera anual o estacional, ya que el SPEI considera la precipitación y la temperatura derivada de la evapotranspiración (Vicente-Serrano et al., 2010a). Aunque para el estado de Chihuahua se han realizado estudios de reconstrucción de precipitación estacional (enero-junio) (Cerano et al., 2009),



precipitación acumulada (octubre-abril) (Irby et al., 2013), no se han realizado estudios de reconstrucción de SPEI, lo cual es importante, ya que una sequía es un fenómeno complejo, en donde adicional a la precipitación, se puede obtener un entendimiento más completo y preciso al integrar otras variables como temperatura y su efecto en la evapotranspiración (Rebetz et al., 2006).

El índice SPEI representa las fluctuaciones de condiciones de sequía cuyos rangos varían de -1 a 1, siendo -1 el rango más severo en intensidad (Vicente-Serrano et al., 2015), en este estudio se presentaron periodos muy cercanos a -1 a lo largo de los 243 años reconstruidos, registrándose para 1775, 1801, 1805, 1860, 1892-1894, 1951, 1953-1954, 2000, 2011-2012, como los más sobresalientes, donde coinciden con periodos que afectaron las actividades económicas productivas del norte de México (Metcalife et al., 1997, Endfield y Fernandez 2006), de igual manera, una coincidencia de periodos de sequía analizados por (Tae-Woong et al., 2009) en las décadas de los 90's, obtenidos mediante el índice PDSI para la CRC. Ortega-Gaucín (2013) reporta en su análisis de caracterización de sequías hidrológicas para la cuenca del río Bravo, un evento extraordinario ocurrido de 1997 a 2005, mientras que otros estudios reportan una sequía intensa ocurrida en la década de 1950, que se extendió hasta el suroeste de Estados Unidos (Woodhouse et al., 2012).

La reconstrucción de SPEI correlaciona de forma negativa pero significativa, con la temperatura media obtenida de datos asimilados para la región de la CRC (-0.68,  $n=39$ ,  $p<0.01$ ), donde se ha corroborado la íntima relación entre este indicador de sequías y la tendencia en aumento en temperatura en zonas áridas (Vicente-Serrano et al., 2010a, Ma et al., 2014). Este patrón indica que el calentamiento global favorece la intensidad de sequías debido al aumento en demanda evapotranspirativa (Jiang et al., 2016). Con respecto a la precipitación, también se obtuvo una correlación significativa en el periodo común de ambas variables ( $r=0.54$ ,  $n=39$ ,  $p<0.01$ ), resultado que corrobora la estrecha relación de la precipitación en el desarrollo de sequías para el centro y norte de México (Ortiz-Gómez et al., 2018), debido a la tele-conexión de fenómenos de circulación global responsables de la precipitación en esta región (Woodhouse et al., 2012).

Desde hace tiempo, se ha demostrado que el índice NDVI es un indicador de sequías en zonas áridas y semiáridas (Tucker y Choudhury et al., 1987), así como un indicador en la dinámica del crecimiento del arbolado en respuesta al cambio climático (Mokira et al., 2017, Correa-Díaz et al., 2019). En este estudio, se encontró una correlación significativa entre la reconstrucción de SPEI y el NDVI procedente de sensores remotos ( $r=0.63$ ,  $n=18$ ,  $p<0.01$ ), resultados similares se han generado de estudios entre el NDVI e índice SPEI y variables climáticas (De Keersmaecker et al., 2016), donde la alta correlación implica que la variabilidad en el verdor de la vegetación está influenciada por la precipitación y evapotranspiración en la región de la CRC en el norte de México, ya que estudios entre SPEI y NDVI muestran que esta relación puede ser no significativa e incluso negativa, debido a la influencia de otros factores como orográficos, edáficos u otros fenómenos atmosféricos con presencia local, que pudieran minimizar la relación de estos indicadores (Zhang et al., 2017). Se obtuvieron frecuencias de 55 y 2.1 años en la reconstrucción de sequías de SPEI provenientes del análisis de densidad espectral y de ondeleta, periodos



asociados con el ENSO en su fase Niña encontrados en reconstrucciones de precipitación desarrolladas previamente para el norte de México (Villanueva et al., 2011).

## Conclusiones

Las series dendrocronológicas analizadas, mostraron una alta asociación con el índice de sequía SPEI a escala de tres meses en su acumulado anual, información que permitió generar una reconstrucción regional de sequías para la cuenca del Río Conchos, en la cual, se identificaron periodos significativos de presencia de sequías, incluso anteriores a los registrados en documentos históricos y registros instrumentales. El uso del SPEI al ser de naturaleza multiescalar, permite identificar el conjunto de sequías acumuladas, las cuales denotan con mayor certeza las condiciones históricas, donde influyen las variables de precipitación y temperatura, variables climatológicas de alta relevancia en la caracterización de eventos secos. El uso de datos asimilados es una alternativa en el modelado histórico y espacial de escenarios en una cuenca hidrológica. En este estudio, se generaron los registros de precipitación y temperatura media mensual procedente del modelo NLDAS-2 de NASA, permitiendo asociar la reconstrucción generada con las condiciones climáticas locales; de manera individual, la precipitación media anual, mostró alta correlación, lo cual es indicador de la calidad de los datos de precipitación y su participación en el índice de sequía SPEI, así como la coherencia en la variabilidad. La temperatura que aunque resultó negativa, fue significativa con el SPEI, lo que se traduce de igual manera en la buena calidad de datos y su relación con la tendencia actual de incremento en temperatura.

El NDVI es un índice empleado en estudios de condiciones de salud en bosques y cultivos, y ha demostrado su valía en el análisis de sequías a nivel regional mediante la reflectancia de la banda roja en el espectro electromagnético, y en este estudio, se demostró esta condición, ya que aunque el periodo común es corto (18 años), su asociación es alta, y permite validar con datos procedentes de sensores remotos, la reconstrucción realizada en este estudio. Análisis de estas características en regiones de rasgos binacionales, son de importancia clave para la caracterización histórica de sequías a nivel cuenca, coadyuvando a una mejor gestión en los recursos naturales, al determinar fluctuaciones y frecuencias de importancia, con repercusiones humanas, económicas y ambientales en los ecosistemas.

## Referencias Bibliográficas

- Beguiría S., Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34: 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.
- Bhandari S, Prasad N, Shah S, Speer J, Raj D, Thapa U (2019) A 307-year tree-ring SPEI reconstruction indicates modern drought in western Nepal Himalayas. *Tree-Ring Research* 75(1): 26-39. <https://doi.org/10.3959/TRR2018-14>.
- Campos DF (2018) Quantification with SPEI of historical Droughts and under probable climatic change in the climatological station Zacatecas, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9(2): 210-233. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-09>.



- Cerano J, Villanueva J, Fulé P, Arreola J, Sánchez I, Valdez RD (2009) Reconstructing 350 years of precipitation in southeast Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 15(2): 27-44. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521189>.
- Cleaveland M, Stahle D, Therrell M, Villanueva-Díaz J, Burns B (2003) Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369-388. <https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2001) Portal de geoinformación. Carta temática de edafología escala 1:100,000. México. [www.conabio.com.mx](http://www.conabio.com.mx). Fecha de consulta 5 de enero de 2019.
- Cook ER, Kairiukstis LA (1990) *Methods of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 1–391.
- Correa-Díaz A, Silva LCR, Horwath WR, Gómez-Guerrero A, Vargas-Hernández J, Villanueva-Díaz J, Velázquez-Martínez A, 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: 1-18. <https://doi.org/10.1029/2018JG004687>.
- De Keersmaecker W, Lhermitte S, Hill M, Tits L, Coppin P, Somers B (2016). Assessment of Regional Vegetation Response to Climate Anomalies: A Case Study for Australia Using GIMMS NDVI Time Series between 1982 and 2006. *Remote Sensing* 9(34): 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs9010034>.
- Díaz-Ramírez B, Villanueva-Díaz J, Cerano-Paredes B (2016) Reconstruction of seasonal precipitation with growth-rings in the hydrological region Presidio San Pedro. *Madera y Bosques* 22(1): 111-123. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221480>.
- Domínguez J (2016) Historical Review of Drought in Mexico: From the Divine Explanation to the Incorporation of Science. *Tecnología y Ciencias del Agua* VII (5): 77-93. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n5/2007-2422-tca-7-05-00077.pdf>. Fecha de consulta 9 de enero de 2019.
- Endfield GH, Fernández-Tejeda I (2006) Decades of Drought, Years of Hunger: Archival Investigations of Multiple Year Droughts in Late Colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75:391-419. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-3492-7>.
- Fritts H (1976) *Tree-rings and climate*. Academic Press. New York, USA. 567 p. <https://www.elsevier.com/books/tree-rings-and-climate/fritts/978-0-12-268450-0>. Fecha de consulta 8 de febrero de 2019.
- García E (1998) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México. [www.conabio.com.mx](http://www.conabio.com.mx). Fecha de consulta 12 de enero de 2019.
- Gennaretti F, Arseneault D, Nicault A, Perreault L, Begin Y (2014) Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111: 10077–10082. <https://doi.org/10.1073/pnas.1324220111>.
- Girardin MP, Guo XJ, Bernier PY, Raulier F, Gauthier S (2012) Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits. *Biogeosciences*, 9: 2523–2536. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2523-2012>.



- Hair J, Anderson E, Tatham L, Black W (1999) *Análisis multivariante*, 5a ed Prentice Hall. Madrid.
- Heim, RR (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. American Meteorology Society* 83: 1149-1165. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>.
- Higgins R, Douglas A, Hahmann A, Berbery E, Gutzler D, Shuttleworth J, Stensrud D, Amador J, Carbone R, Cortéz M, Douglas M, R. Lobato, Meitin J, Ropelewski Ch, Schemm J, Schubert S, Zhang Ch (2003) Progress in Pan American Clivar Research: The North American Monsoon System. *Atmósfera* 16:29-65. <http://www.redalyc.org/pdf/565/56516103.pdf>. Fecha de consulta 13 de enero de 2019.
- Hoell A, Funk C, Barlow M, Shukla S (2015) Recent and Possible Future Variations in the North American Monsoon. *The Monsoons and Climate Change*, 149–162. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21650-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21650-8_7).
- Homdee T, Pongput K, Kanae S (2016) A comparative performance analysis of three standardized climatic drought indices in the Chi River basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources* 50: 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2016.02.002>.
- Hope A, Boynton W, Stow D (2003) Inter-annual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed based on the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3413–3425. <https://doi.org/10.1080/0143116021000021170>.
- Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S (2004) Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics, European Geosciences Union (EGU)*, 2004 11: 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2013) Continuo de elevaciones Mexicano 3.0. Aguascalientes, México. [www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx). Fecha de consulta 5 de enero de 2019.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros VR, C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 688. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_Front\\_matters.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf). Fecha de consulta 5 de enero de 2019.
- Irby C, Fulé P, Yocoom L, Villanueva J (2013) Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 19(1): 93-105. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.191349>.
- Jenkerson C, Maiersperger T, Schmidt G (2010) eMODIS: A user-friendly data source, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010- 1055, 10.
- Jiang P, Liu H, Wu X, Wang H (2016) Tree-ring-based SPEI reconstruction in central Tianshan Mountains of China since A.D. 1820 and links to westerly circulation. *Royal Meteorological Society*. 37(6): 2863-2872. <https://doi.org/10.1002/joc.4884>.
- Karniel A, Agam N, Pinker R, Anderson M, Lmhoff M, Gutman G, Panov N, Goldberg A (2010) Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment:





- Merits and Limitations. *Journal of Climate* 23: (618-633). <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>.
- Langenbrunner B (2019) A stronger South Asian monsoon. *Nature Climate Change* 9(5): 352–352. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0472-2>.
- Li M, Duan J, Wang L, Zhu H (2018) Late summer temperature reconstruction based on tree-ring density for Sygera Mountain, southeastern Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 163, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.02.005>.
- Linares M (2004) La sequía en la cuenca del río Bravo: principios de política. *Gaceta Ecológica* 70:57-66. <http://www.redalyc.org/pdf/539/53907005.pdf>. Fecha de consulta 14 de febrero de 2019.
- Lorenzo-Lacruz J, Vicente-Serrano SM, López-Moreno J, Beguería S, García-Ruiz JM, Cuadrat JM (2010) The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology* 386: 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>.
- Ma M, Ren L, Yuan F, Jiang S, Liu Y, Kong H, Gong L (2014) A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use. *Hydrological Processes* 28(23): 5645-5661. <https://doi.org/10.1002/hyp.10063>.
- Ma Y, Liu Y, Song H, Sun J, Lei Y, Wang Y (2015) A Standardized Precipitation Evapotranspiration Index Reconstruction in the Taihe Mountains Using Tree-Ring Widths for the Last 283 Years. *PLoS ONE* 10(7): 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133605>.
- McKee TB, Doesken, NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. AMS, Boston, MA, pp.179-184. [http://www.droughtmanagement.info/literature/AMS\\_Relationship\\_Drought\\_Frequency\\_Duration\\_Time\\_Scales\\_1993.pdf](http://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf). Fecha de consulta 25 de enero de 2019.
- Medhaug I, Stolpe MB, Fischer EM, Knutti R (2017) Reconciling controversies about the “global warming hiatus.” *Nature*, 545(7652): 41–47. <https://doi.org/10.1038/nature22315>.
- Meko DC, Stockton W, Bogges WR. (1996) The tree–ring record of severe sustained drought. *Water Resources* 31: 789 – 801. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03401.x>.
- Méndez M, Magaña V (2010) Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *American Meteorological Society* 23:1175-1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>.
- Mérian P, Pierrat JC, Lebourgeois F (2013) Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31(1):58-67. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.07.001>.
- Metcalfe SE, Bimpson A, Courtice AJ, OHara SL, Taylor DM (1997) Climate change at the monsoon/Westerly boundary in Northern Mexico. *Journal of Paleolimnology* 17(2), 155–171. <https://doi.org/10.1023/A:1007905824147>.
- Mokria M, Tolera M, Sterck FJ, Gebrekirstos A, Bongers F, Decuyper M., Sass-Klaassen U (2017) The frankincense tree *Boswellia neglecta* reveals high potential for restoration of woodlands in the Horn of Africa. *Forest Ecology and Management*, 385, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.020>.
- Mocko D (2012) NASA/GSFC/HSL, NLDAS Primary Forcing Data L4 Monthly 0.125 x 0.125 degree V002, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and



- Information Services Center (GES DISC), Accessed: 22 mayo 2019. <https://doi.org/10.5067/Z62LT6J96R4F>.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2003) Tree Ring Data from the International Tree-Ring Data Bank (ITRDB), NOAA/NCDC Paleoclimatology Program. <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/ftp-treering.html>. Fecha de consulta 16 de enero de 2019.
- NOAA Paleoclimatology Program (2000) North American Drought: A Paleo Perspective. <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/drought/>. Fecha de consulta 8 de febrero de 2019.
- Ortega-Gaucin D (2013) Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*. 31(3):167-180. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/283/225>. Fecha de consulta 13 de marzo de 2019.
- Ortiz-Gómez R, Cardona-Díaz J, Ortiz-Robles F, Alvarado-Medellin P (2018) Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9(33):47-73. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2018-03-03>.
- Palmer WC (1968) Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the Crop Moisture Index. *Weatherwise* 21: 156-161. <https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>.
- Pompa-García M, Jurado E (2013). Seasonal precipitation reconstruction and teleconnections with ENSO based on tree ring analysis of *Pinus cooperi*. *Theoretical and Applied Climatology* 117: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1018-6>.
- Perdigón-Morales J, Romero-Centeno R, Ordóñez P, Bradford B (2018) The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *International Journal of Climatology* 38(5): 2174-2186. <https://doi.org/10.1002/joc.5322>.
- Quiring SM, Papakryiakou TN (2003) An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology* 118: 49-62. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00072-8).
- Rebetez M, et al., (2006) Heat and drought 2003 in Europe: A climate synthesis. *Annals of Forest Science* 63: 569-577. <https://doi.org/10.1051/forest:2006043>.
- Seager R, Goodard L, Nakamura J, Henderson N, Lee D (2014) Dynamical causes of the 2010/11 Texas-Northern Mexico Drought. *Journal of Hydrometeorology* 15(1): 39-68. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-024.1>.
- Senatore A, Hejabi S, Mendicino G, Bazrafshan J, Irannejad P (2019) Climate conditions and drought assessment with the Palmer Drought Severity Index in Iran: evaluation of CORDEX South Asia climate projections (2070–2099). *Climate Dynamics* 52(1-2): 865-981. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4171-x>.
- Serrano-Barrios L, Vicente-Serrano SM, Flores-Magdaleno H, Tijerina-Chávez L, Vázquez-Soto D (2016) Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca pacífico norte de México (1961-2010), 42(1):185-204. <https://doi.org/10.18172/cig.2857>.
- Šímová I, Storch D (2017) The enigma of terrestrial primary productivity: Measurements, models, scales and the diversity–productivity relationship. *Ecography*, 40(2), 239–252. <https://doi.org/10.1111/ecog.02482>.



- Stahle D, D'Arrigo P, Krusic M, Cleaveland K, Cook E, Allan R, Cole J, Dunbar R, Therrell M, Gay D, Moore M, Stokes M, Burns B, Villanueva J, Thompson L (1998) Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(10): 2137-2152. <https://doi.org/10.1175/15200477>. Steel R, Torrie J (1980) Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. Second edition. McGraw Hill, New York. 633 pp. <https://trove.nla.gov.au/work/9171434>. Fecha de consulta 8 de marzo de 2019.
- Stow D, Hope A, McGuire D (2004) Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 89, 281–308. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.018>.
- Tae-Woong K, Valdés J, Aparicio J (2009a) Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International* 27(3): 420-430. <https://doi.org/10.1080/02508060208687021>.
- Tae-Wong K, Valdés J, Aparicio J (2009b) Spatial Characterization of Droughts in the Conchos River Basin Based on Bivariate Frequency Analysis. *Water International* 31(1): 50-58. <https://doi.org/10.1080/02508060608691914>.
- Thirumalai K, DiNezio P, Okumura Y, Deser C (2017) Extreme temperatures in Southeast Asia caused by El Niño and worsened by global warming. *Nature Communications* 8, 15531. <https://doi.org/10.1038/ncomms15531>.
- Tirivarombo S, Osupile D, Eliasson P (2018) Drought Monitoring and Analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth* 106: 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>.
- Törnros T, Menzel L (2014) Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(1): 305-318. <https://doi.org/10.5194/hess-18-305-2014>.
- Tucker CJ, Choudhury BJ (1987) Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment* 23: 243–251. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90040-X).
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, Lópezmoreno JI (2010a) A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 23: 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, Lópezmoreno JI, Angulo M, Kenawy AE (2010b) A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscale drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. *J. Hydrometeorol.* 11: 1033–1043. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>.
- Vicente-Serrano SM, Van Der G, Beguería S, Azorin-Molina C, López-Moreno JL (2015) Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology* 426: 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.025>.
- Villanueva-Diaz J, Stahle DW, Luckman BH, Cerano-Paredes J, Therrell MD, Cleaveland MK, Cornejo-Oviedo E (2007) Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1-2), 117–131. <https://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>.



- Villanueva-Díaz J, Cerano J, Constante V, Stahle DW, Estrada J, Tostado MM (2011) Variabilidad hidroclimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:221-234. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342011000800005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800005&lng=es&tlng=es). Fecha de consulta 16 de enero de 2019.
- Villanueva J, Gómez A, Cerano J, Rosales S, Estrada J, Castruita L, Martínez A (2017) The streamflow variability of the Acaponeta River inferred from tree-ring series of conifers. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(3): 55-74. <http://dx.doi.org/10.24850/jtyca-2017-03-04>.
- Villanueva-Díaz J, Rubio-Camacho EA., Chávez-Durán AA, Zavala-Aguirre JL, Cerano-Paredes J, Martínez-Sifuentes AR (2018) Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1): 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>.
- Woodhouse C, Stahle D, Villanueva J (2012) Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over the past 500 years. *Climate Research* 51:125-136. <https://doi.org/10.3354/cr01059>.
- Xia Y, Mitchell K, Ek M, Sheffield J, Cosgrove B, Wood E, Luo L, Alonge C, Wei H, Meng J, Livneh B, Lettenmaier D, Koren V, Duan Q, Mo K, Fan Y, Mocko D (2012) Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS-2): 1. Intercomparison and application of model products, *J. Geophys. Res.*, 117. <https://doi.org/10.1029/2011JD016048>.
- Zhang Q, Kong D, Singh V, Shi P (2017) Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change* 152:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.02.008>.
- Zhao Y, Shi J, Shi S, Yu J, Lu H (2017) Tree-ring latewood width based July–August SPEI reconstruction in South China since 1888 and its possible connection with ENSO. *Journal of Meteorological Research*, 31(1), 39–48. <https://doi.org/10.1007/s13351-017-6096-4>.
- Zhu LJ, Zhang YD, Li ZS, Guo BD, Wang XC (2016) A 368-year maximum temperature reconstruction based on tree-ring data in the northwestern Sichuan Plateau (NWSP), China. *Climate of the Past*, 12: 1485–1498. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1485-2016>.