

Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México

• Mónica Castillo-Castillo • Laura A. Ibáñez-Castillo* •
Universidad Autónoma Chapingo, México

*Autor para correspondencia

• Juan B. Valdés •
The University of Arizona, USA

• Ramón Arteaga-Ramírez • Mario A. Vázquez-Peña •
Universidad Autónoma Chapingo, México

Resumen

Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (enero-febrero, 2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 35-52.

En este trabajo se realiza un análisis temporal y espacial de la sequía en la cuenca del río Fuerte para el periodo de 1961 a 2012. La cuenca del río Fuerte se ubica al noroeste de México, en la zona de baja presión, donde coinciden en latitud los grandes desiertos del mundo; en la parte alta de la cuenca viven diversos grupos indígenas en condiciones de pobreza y en la parte baja se ubica una zona agrícola bajo riego muy importante. Se calcularon dos índices de sequía: (1) el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y (2) el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI); ambos índices fueron calculados en 14 estaciones del área de estudio para escalas de 3, 6, 12 y 24 meses. Se utilizaron datos de precipitación, y temperatura mínima y máxima para el cálculo. Los índices fueron calculados y analizados temporal y espacialmente. Los resultados mostraron que las sequías han alterado su patrón de ocurrencia y se presentan con mayor frecuencia, intensidad y duración en las últimas décadas. Se encontraron dos periodos de sequías extremas: de 1999 a 2004 y de 2011 en adelante. El SPEI define mejor los periodos secos y presenta un comportamiento más estable que el SPI, además muestra una tendencia más clara del aumento en la intensidad de la sequía en los últimos años, producto de la reducción de la precipitación y el aumento de las temperaturas.

Palabras clave: SPI, SPEI, escala temporal, análisis temporal y espacial de sequías

Introducción

La sequía es uno de los fenómenos meteorológicos que causa más estragos a nivel ecológico,

Abstract

Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (January-February, 2017). Analysis of meteorological drought in the Fuerte River Basin, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(1), 35-52.

In this research is presented a temporal and spatial analysis of drought in the Fuerte River Basin for the period 1961 to 2012. The Fuerte River Basin is located Northwest of México, in the area of low pressure which match the great deserts of the world; in the high basin several Indian populations are located and in the low part is located an important irrigation farming area. Two index were calculated: (1) the Standardized Precipitation Index (SPI), and, (2) Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI); both index were calculated in 14 stations of the study area for scales of 3, 6, 12 and 24 months. Data of precipitation, minimum and maximum temperatures were used for the index calculation. The indices were calculated and analyzed in time and space. Results showed that droughts have altered its occurrence patterns and presents with more frequency, intensity and duration in the last decades. It was found two periods with extremes droughts, from 1999 to 2004 and from 2011 onwards. SPEI defines drought periods better and presents a behavior more stable than SPI, moreover shows a clear trend of increase in drought intensity in recent years as a result of reduction on precipitation and increase of temperatures.

Keywords: SPI, SPEI, temporal and spatial drought analysis.

Recibido: 01/12/2015
Aceptado: 30/08/2016

económico y social en el mundo. Es un fenómeno extremo que consiste en la nula precipitación o en su reducción por debajo del promedio durante un periodo de tiempo. Los efectos del cambio

climático acentúan los efectos destructivos de las sequías, como su intensidad, severidad y duración.

El análisis de sequías consiste en la caracterización del fenómeno mediante el desarrollo de índices de sequía. En las últimas décadas se han desarrollado diversos índices para caracterizar y definir las sequías. Un índice de sequía es una variable principal para evaluar los efectos de sequía y definir sus diferentes parámetros (Mishra & Singh, 2010).

Los estudios sobre la variabilidad climática son importantes para el diseño y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Los beneficios sociales derivados de estos sistemas están directamente relacionados con la confiabilidad de las estadísticas climáticas. Los sistemas de recursos hídricos han sido planeados y son operados sobre el supuesto de que las características climáticas deben ser similares a las observadas hace 30 años. Recientemente, se ha debatido sobre el aparente incremento en grandes áreas del planeta de los eventos secos y sobre las posibles causas de este fenómeno. Por lo tanto, a fin de evaluar de manera objetiva la ocurrencia de la sequía y comprender mejor las recientes fluctuaciones climáticas, vale la pena estudiar series de temperatura y precipitación a largo plazo en regiones con condiciones climático-hidrológicas no homogéneas (Bonaccorso, Bordi, Cancelliere, & Rossi, 2003).

La incidencia de las sequías, de cualquier grado de severidad, ha sido más común en años recientes en paralelo con los cambios globales del clima. La sequía es un fenómeno gradual, que puede durar muchos años y tener devastadores efectos socioeconómicas, agrícolas, ganaderos y ambientales, que pueden ser el resultado de uno o más de los factores de la escasez del agua, como precipitación insuficiente, alta evapotranspiración y sobreexplotación de los recursos hídricos (Al-Qinna, Hammouri, Obeidat, & Ahmad, 2010).

El estudio de las sequías en la cuenca del río Fuerte, localizada en los estados de Sinaloa, Chihuahua, Sonora y Durango, en México, es importante porque, por un lado, en la parte

alta de la cuenca viven los tarahumaras, que a finales de 2011, principios de 2012, sufrieron las consecuencias de las sequías, exacerbadas por sus ya existentes niveles de pobreza (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2012; El Informador, 2012; La Jornada, 2012). Y por otro lado, en la parte baja de la cuenca se localizan importantes obras hidráulicas, como la presa Miguel Hidalgo y Costilla también conocida como "El Mahome", ubicada sobre la corriente del río Fuerte y operada por el Distrito de Riego 075, su agua se utiliza para irrigación y generación de electricidad; la presa Luis Donald Colosio, llamada "Huites", se ubica sobre el río Fuerte y es operada por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), su uso es para irrigación y generación de electricidad; y la presa Josefa Ortiz de Domínguez, que se ubica sobre el río Álamos, también llamada "El Sabino", operada por el Distrito de Riego 076, su agua es utilizada con fines de irrigación (Conagua, 2010). Estas presas son la principal fuente de abastecimiento de agua para uso agrícola, urbano e industrial. En el ciclo agrícola 2013-2014, el Distrito de Riego 075 El Fuerte tuvo una superficie cosechada de 273 152 ha, un rendimiento total de 10.76 ton/ha y un valor de cosecha de 12.6 millones de miles de pesos, por lo que es el más importante del Organismo de Cuenca Pacífico Norte; en el mismo ciclo agrícola, el Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo tuvo una superficie cosechada de 66 035 ha, un rendimiento general de 6.75 ton/ha y un valor de cosecha de 1.6 millones de miles de pesos (Conagua, 2015a). Actualmente, la cuenca enfrenta una grave problemática de escasez de recursos hídricos, derivados del aumento en la demanda de agua y su uso ineficiente; el número limitado de cultivos y los efectos del cambio climático, que provoca bajo régimen de lluvia y la ocurrencia recurrente de fenómenos de sequía; además de la carencia de una red de monitoreo; sistemas de alerta temprana, y planes de contingencia ante las sequías, por lo que sus efectos son más severos (Conagua, 2014).

El presente trabajo consistió en el análisis de sequías de la cuenca del río Fuerte en el periodo 1961-2012, y tiene como objetivos el desarrollo

de los índices SPI y SPEI, así como la caracterización de la sequía meteorológica temporal y espacial en la cuenca. El SPEI surgió como un novedoso índice de sequía multiescalar, sensible a los efectos del calentamiento global. Fue propuesto por Vicente, Beguería y López (2010) y está basado en datos de precipitación y temperatura; tiene la capacidad de incluir la variabilidad de demanda evaporativa en la evaluación y monitoreo de sequías.

Materiales y métodos

Descripción de la cuenca

La cuenca del río Fuerte se ubica en el noroeste de México, geográficamente entre 25.68° y 28.24° de latitud norte, y entre -106.12° y -109.43° de longitud oeste. El río Fuerte nace en la Sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua, Durango y Sonora, y desemboca al norte del estado de Sinaloa, en el Golfo de California (figura 1). Las localidades más importantes económica y demográficamente dentro de la cuenca

son Los Mochis, El Fuerte y Choix, en Sinaloa; Batopilas, Urique y Chinipas, en Chihuahua; El Vergel y Guadalupe y Calvo, en Durango, y Álamos, en Sonora.

La cuenca del río Fuerte es una de las más importantes dentro de la Región Hidrológica 10 tanto por su gran extensión superficial y agricultura bajo riego como por el volumen de los escurrimientos que en ella se generan y sus obras hidráulicas, como las presas Miguel Hidalgo, Josefa Ortiz y Huites. La cuenca es exorreica, con un área total de 36 457 km²; el parteaguas presenta una elevación máxima de 3 168 msnm; el punto más bajo de la cuenca es de -9 msnm (figura 2).

La cuenca presenta una precipitación media anual de 691 mm (figura 2) y distribución temporal definida en dos periodos de lluvias en la zona: verano e invierno. Las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos meteorológicos, como ciclones, los cuales se presentan por lo general de julio a septiembre; la segunda etapa de lluvia es producto de los frentes fríos, de diciembre a febrero. El

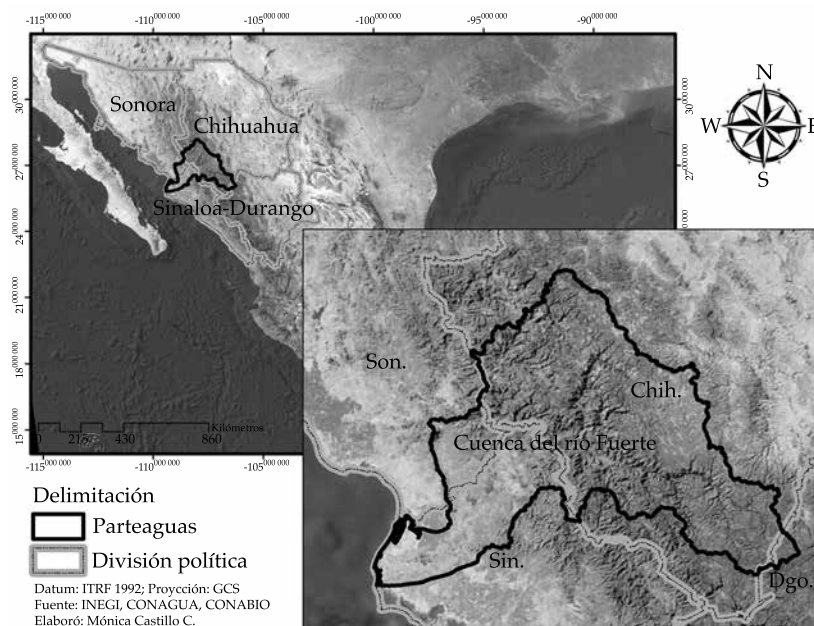


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Fuerte.

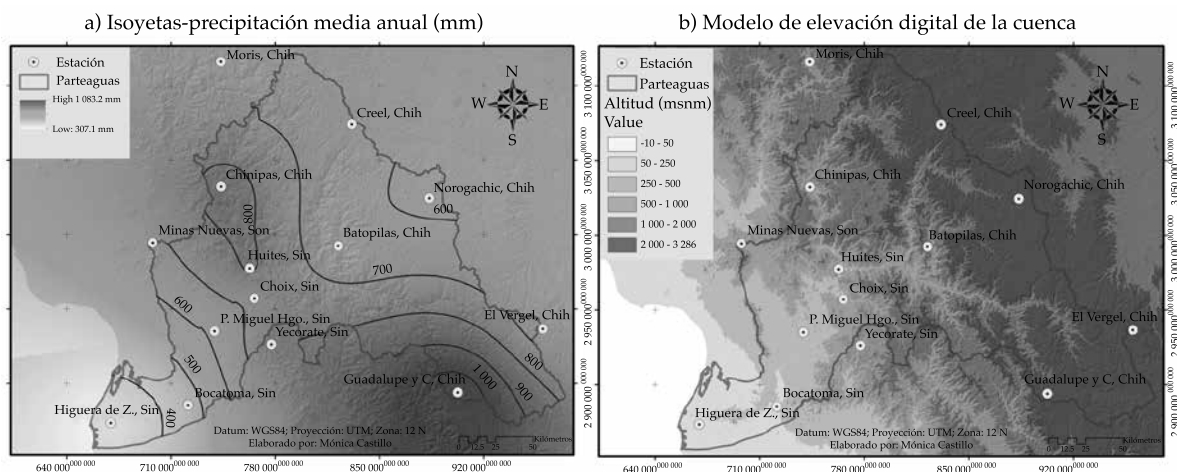


Figura 2. (a) Isoyetas de precipitación media anual; (b) Modelo de elevación digital de la cuenca del río Fuerte.

periodo de estiaje ocurre de marzo a mayo. La evaporación media anual es de 2 178 mm, 3.15 veces la precipitación anual (Pronacose, 2014).

Información climatológica

La información cartográfica e hidrológica utilizada en la caracterización física del área de estudio, como modelos de elevación digital, coberturas digitales de cuencas, ríos y presas fue obtenida de bases de datos del Instituto

Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014) y la Conagua (2015b).

Se realizó el acopio de datos mensuales de precipitación, y temperatura mínima y máxima en el periodo 1961-2012 para 14 estaciones meteorológicas (cuadro 1), los cuales fueron obtenidos de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional todos los días (SMN, 2014) y del *ERIC III 2.0* (IMTA, 2009). La figura 2 muestra la distribución espacial de tales estaciones.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas de la cuenca del río Fuerte.

Clave	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación media (mm)	T. mín. (°C)	T. máx. (°C)	Periodo	% datos generados
8038	Creel, Chihuahua	2,348	648.7	1.7	20.2	1961-2011	10.8
8106	Norogachic, Chihuahua	2,088	578.8	2.7	21.6	1961-2011	20.7
8161	Batopilas, Chihuahua	678	603.4	16.7	31.3	1961-2011	29.4
8167	Chinipas, Chihuahua	440	838.2	16.0	31.0	1961-2011	2.6
8172	Guadalupe, Chihuahua	2,279	1,083.2	4.0	22.3	1961-2011	2.9
8182	Moris, Chihuahua	754	627.8	11.0	29.4	1961-2011	3.1
8267	El Vergel, Chihuahua	2,740	629.7	0.6	17.6	1961-2012	24.8
25009	Bocatoma, Sinaloa	31	456.6	17.0	33.0	1961-2012	2.6
25019	Choix II, Sinaloa	239	707.0	14.2	34.2	1961-2012	1.9
25025	P. Miguel H., Sinaloa	144	619.8	16.6	33.8	1961-2012	1.3
25042	Higuera, Sinaloa	10	307.1	17.3	31.5	1961-2012	7.9
25044	Huites, Sinaloa	269	812.7	16.4	34.8	1961-2012	2.4
25100	Yecorato, Sinaloa	400	796.1	13.5	34.9	1961-2012	6.1
26053	Minas Nuevas, Sonora	480	672.4	15.0	31.2	1961-2011	5.7

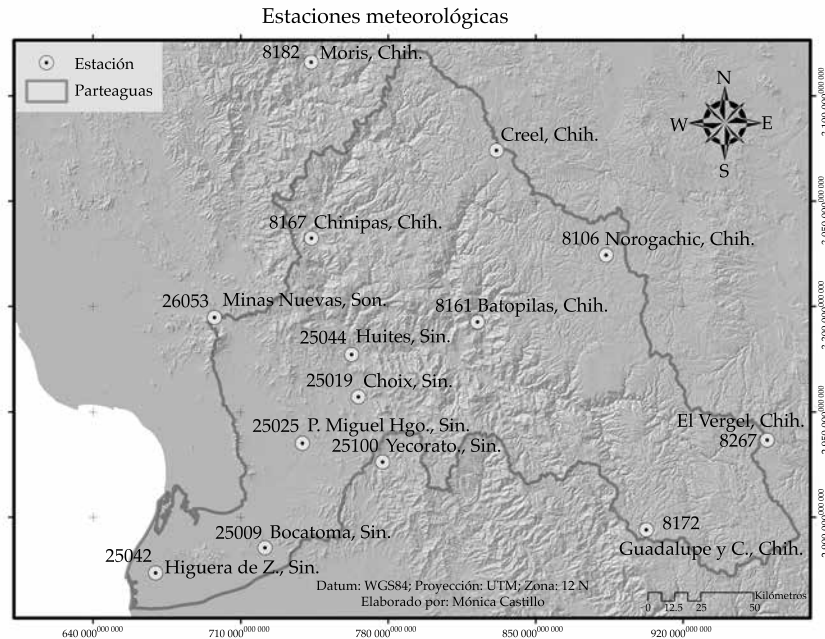


Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Metodología

Las series de datos de precipitación y temperatura mínima y máxima presentaron ausencia de registros durante el periodo de estudio, por lo que se utilizó el Método del Inverso del Cuadrado de la Distancia o Método del US National Weather Service para la generación de datos perdidos. Este método considera que el dato faltante de una estación A puede ser estimado con base en los datos observados en las estaciones circundantes, y puede aplicarse para estimar valores diarios, mensuales y anuales faltantes (Campos, 1998).

El procedimiento consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W , igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina i y la estación x ; el dato buscado P_x será igual que:

$$P_x = \sum (P_i - W_i) / \sum W_i \quad (1)$$

Donde P_i es el dato observado para la fecha de la faltante en las estaciones auxiliares

circundantes (mínimo 2), en las unidades del dato buscado; $W_i = \frac{1}{D_i^2}$ donde D_i es la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en kilómetros.

Se procuró seguir la recomendación de utilizar cuatro estaciones auxiliares (más cercanas a la estación con el dato faltante); sin embargo, cuando no fue posible, se utilizaron las dos o tres más cercanas a la estación con datos faltantes.

Índices de sequía

Los índices de sequía fueron desarrollados para reducir el número de variables que intervienen en una sequía a un simple número, con el propósito de definir y comparar sus características. Los índices más simples hacen uso sólo de la precipitación media, otros más complejos utilizan, además de la precipitación, algunos otros parámetros como temperatura, evapotranspiración, pérdida de humedad del suelo y humedad antecedente del suelo (Escalante & Reyes, 2005). En general, se dice que cuando

un índice de sequías considera como principal dato a la precipitación, se habla de una sequía meteorológica.

Se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (Standardized Precipitation Index, SPI) por ser uno de los más empleafos en Norteamérica para propósitos de planeación o para la evaluación de sequías con fines operativos. Además, recientemente, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) lo ha recomendado para ser utilizado en el National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) en todo el mundo, para la caracterización de las sequías (WMO, 2012).

El procedimiento para el cálculo del SPI es el descrito por Edwards y McKee (1997), y el *software SPI SL 6.exe* es de distribución gratuita y puede ser obtenido en la página web del National Drought Mitigation Center (NDMC, 2014). El SPI fue originalmente desarrollado por Edwards y McKee (1997) en la Universidad de Nebraska-Lincoln y más tarde adoptado por el NDMC de los Estados Unidos de América (2014). El procedimiento de cálculo del SPI, en primer lugar, realiza el ajuste de la función de densidad de probabilidad (fdp) gamma del registro de precipitación para cada estación meteorológica. Posteriormente, los valores ajustados se transforman a la fdp normal con media cero y varianza uno (normal estándar), que representa el valor del SPI. Para periodos de tiempo mayores a un mes, el procedimiento básico inicial para estimar el SPI es tomar sumas móviles, al disponer de una serie larga y confiable (30 años o más) es posible calcular el SPI en cualquier mes del registro para los i meses previos. El SPI permite determinar la rareza de una sequía o un evento húmedo anómalo a una escala de tiempo particular para cualquier lugar del mundo con registros de precipitación. El SPI se desarrolló a escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses. Según Velasco, Aparicio, Valdés, Velázquez y Kim (2004), en regiones áridas es conveniente definir el índice a escalas mayores a un mes, ya que escalas menores no permiten distinguir entre el déficit de lluvia respecto a las condiciones de largo plazo ni a las variaciones

propias de la precipitación, por lo que para efectos prácticos, una escala apropiada es la de tres meses, dado que la cuenca presenta climas muy secos, secos, semisecos y subhúmedos en su territorio.

El SPEI es un índice propuesto por Vicente *et al.* (2010), está basado en datos de precipitación y temperatura, y tiene la ventaja de combinar el carácter multiescalar, con la capacidad de incluir los efectos de la variabilidad de la temperatura en la evaluación de sequías. El procedimiento de cálculo es similar al del SPI, pero en lugar de precipitación, el SPEI utiliza el valor de la diferencia mensual entre la precipitación y evapotranspiración como dato de entrada, lo que representa un balance hídrico climático simple (Thornthwaite, 1948); esta diferencia es ajustada a una distribución log logística, que después es transformada a una distribución normal estándar con media 0 y varianza 1 (Vicente *et al.*, 2010). El cálculo del SPEI se realizó en el programa *RStudio*® (Rstudio, 2014) mediante la paquetería *SPEI.R*, desarrollado por Beguería y Vicente (2014), a las mismas escalas temporales que el SPI, con datos de precipitación, temperatura mínima y máxima, y latitud de la estación; el método seleccionado para el cálculo de la evapotranspiración fue el de Hargreaves.

Los índices de sequía SPI y SPEI emplean la misma clasificación para las condiciones de sequía; la interpretación de los resultados se realizó con base en el cuadro 2.

Con el valor medio en la cuenca del SPI y SPEI en las diferentes escalas, se procedió a su análisis temporal, con el objetivo de conocer la evolución de las sequías; identificar los periodos de sequía moderada, severa y extrema; y definir su intensidad, duración, y fechas aproximadas de inicio y término. A partir de la identificación de los periodos de sequía que se presentaron, se realizó el análisis espacial de los meses con sequía más intensa de cada escala temporal.

Usando estos índices como indicadores, un evento de sequía para una escala de tiempo i es definida como un periodo en el cual el índice es continuamente negativo y alcanza valores de -1.0 o menos, y termina cuando el índice

Cuadro 2. Categorías y clasificación del SPI y SPEI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).

Clasificación del SPI y SPEI	
Valor del índice	Categoría
> 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy o severamente húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal
-1.49 a -1.00	Moderadamente seco
-1.99 a -1.49	Muy o severamente seco
< -2.00	Extremadamente seco

alcanza nuevamente un valor positivo (McKee *et al.*, 1993).

El valor medio de los índices, obtenido mediante polígonos de Thiessen, indica la variabilidad de las variables meteorológicas con respecto a su media histórica. Los mapas de los siguientes apartados muestran los patrones espaciales de los meses con mayor intensidad histórica de la sequía a escalas de 3, 6, 12 y 24 meses de los índices, en donde las características para periodos cortos o largos se clasifican según el Monitor de Sequía de México del SMN (2015) como:

- a) 3 meses: indica las condiciones de humedad del suelo.
- b) 6, 12, 24 meses: indica los impactos en los niveles de reserva de cuerpos de agua.

Resultados y discusión

Se realizó el análisis de las variables que intervinieron en el desarrollo de los índices SPI y SPEI, mediante sus valores medios mensuales en cada década del periodo 1961-2012. En la figura 4 se observa que la precipitación media mensual tuvo su pico máximo en la década de 1980 y se ha reducido en las más recientes; el balance precipitación-*evapotranspiración* (Pt-PET) presenta en la última década las condiciones de mayor déficit del periodo estudiado; la temperatura mínima media mensual se redujo en casi 0.5 °C, en comparación de la década de 1990, y la máxima se ha incrementado gradualmente a

partir de 1970. El comportamiento de la temperatura mínima se debe, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2013), a que durante el decenio de 2001-2010 no se experimentó ningún fenómeno de El Niño importante, que por lo normal se relaciona con el calentamiento del clima mundial. Hasta mediados de 2006 prevalecieron los episodios de La Niña y las condiciones neutras, seguidos de un breve episodio de El Niño. Esta variabilidad natural a corto plazo puede haber enmascarado algunos de los efectos del cambio climático a largo plazo. Sin embargo, el comportamiento de la temperatura máxima sí refleja esta tendencia, indicando mayor oscilación térmica en la última década.

A continuación se muestran los resultados del SPI y SPEI en la cuenca del río Fuerte a escalas temporales de 3, 6 12 y 24 meses. El análisis temporal se realizó de manera general con el valor medio de los índices en la cuenca para cada mes de la serie, obtenidos con polígonos de Thiessen, así como en sus diferentes partes, considerando las siguientes estaciones: en la parte alta, la 8038 Creel (norte) y 8172 Guadalupe (sur); en la parte media, la 8161 Batopilas; y en la parte baja, la 25009 Bocatoma. El análisis espacial se realizó en el programa *ArcGIS*® (ESRI, 2012), mediante la interpolación de los datos puntuales de cada estación en los meses de sequía más intensa para cada escala temporal.

En la figura 5 se muestran las series históricas del SPI y SPEI a una escala de tres meses. Las series de los índices a esta escala se mueven con rapidez entre valores negativos y positivos

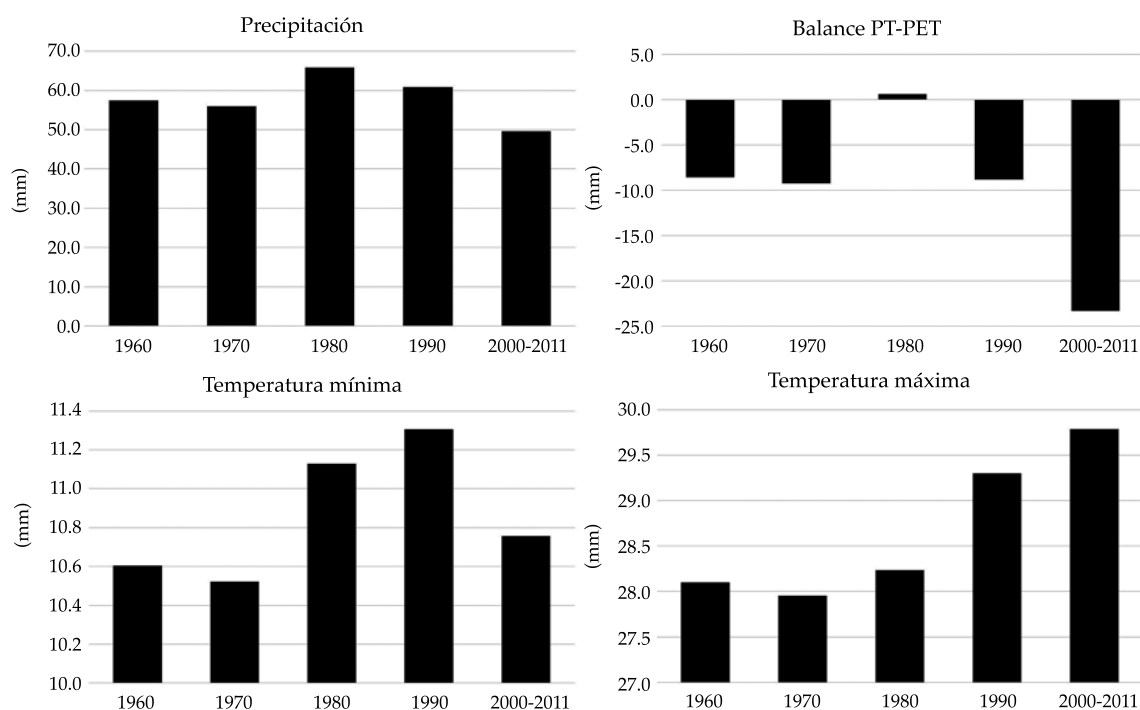


Figura 4. Comportamiento histórico de las variables que intervienen en el cálculo del SPI y SPEI, valores medios mensuales.

debido a que el periodo en que las variables son tomadas en cuenta es muy corto y los cambios son asimilados a mayor velocidad. El comportamiento de ambos índices es similar. De manera general, en la cuenca los valores oscilan entre -2.0 y 2.5, y los periodos de sequía moderada son más frecuentes al final de la serie. En particular, al norte de la parte alta de la cuenca, la estación Creel presentó dos sequías extremas entre 2009 y 2011, con valores menores de -3.0; por el contrario, hacia el sur de la parte alta, en Guadalupe, no se presentaron estos eventos. De manera individual, los índices de las estaciones oscilan en rango mayor, indicando periodos secos más intensos. La estación Bocatoma en la parte baja muestra periodos secos y húmedos más intensos que el SPEI a partir del año 2006.

La figura 6 muestra las series del SPI y SPEI a una escala temporal de seis meses. El valor medio de la cuenca oscila entre -2.5 y 2.0. Los periodos secos fueron más intensos a esta escala que los húmedos y los dos más importantes se

presentaron en 1999 y 2011. En la parte alta de la cuenca, la estación Creel presentó eventos secos extremos en 2009 y 2011 con el SPI, a diferencia del SPEI, que los señala de menores. En la estación Bocatoma, parte baja, se continúa observando un desfase considerable entre el SPI y SPEI, donde el SPEI muestra mayor intensidad que el SPI entre 2000 y 2001.

En ambas escalas temporales (3 y 6 meses) del SPI y SPEI se encontró que los eventos secos se hacen más intensos a partir de la segunda mitad de la serie, principalmente en el periodo 2000-2011. El valor medio de la cuenca, así como en la parte alta y media, el SPI mostró mayor intensidad de los eventos secos que el SPEI, excepto para la parte baja en la estación Bocatoma.

El comportamiento de los índices a escalas temporales pequeñas es muy variable y alternan rápidamente entre periodos húmedos de corta duración, como lo señala McKee *et al.* (1993), que a nivel de escalas temporales, cuando los periodos de tiempo son pequeños (3 o 6 meses),

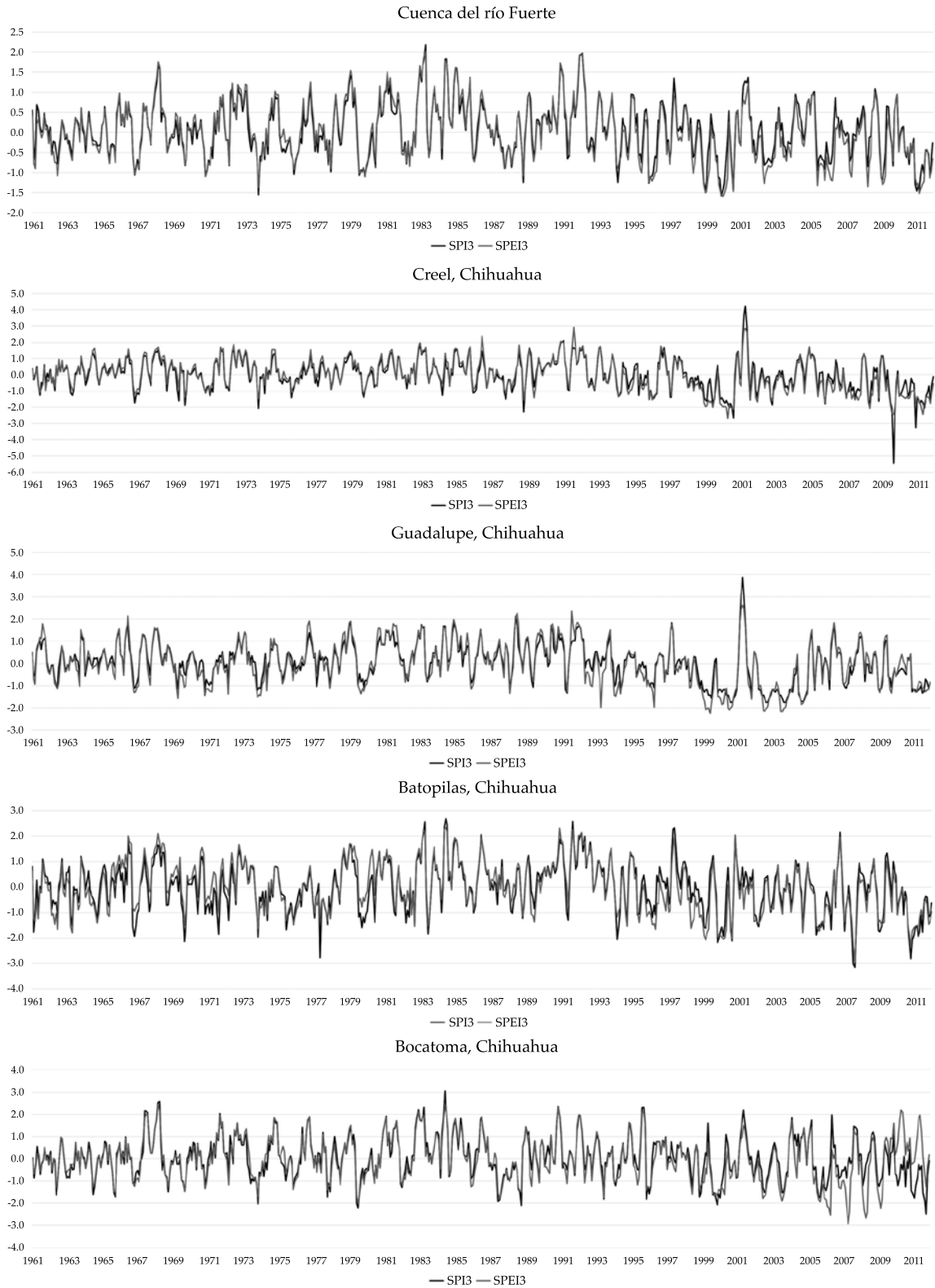


Figura 5. SPI y SPEI de tres meses para la cuenca del río Fuerte y para la parte alta (Creel y Guadalupe), media y baja.

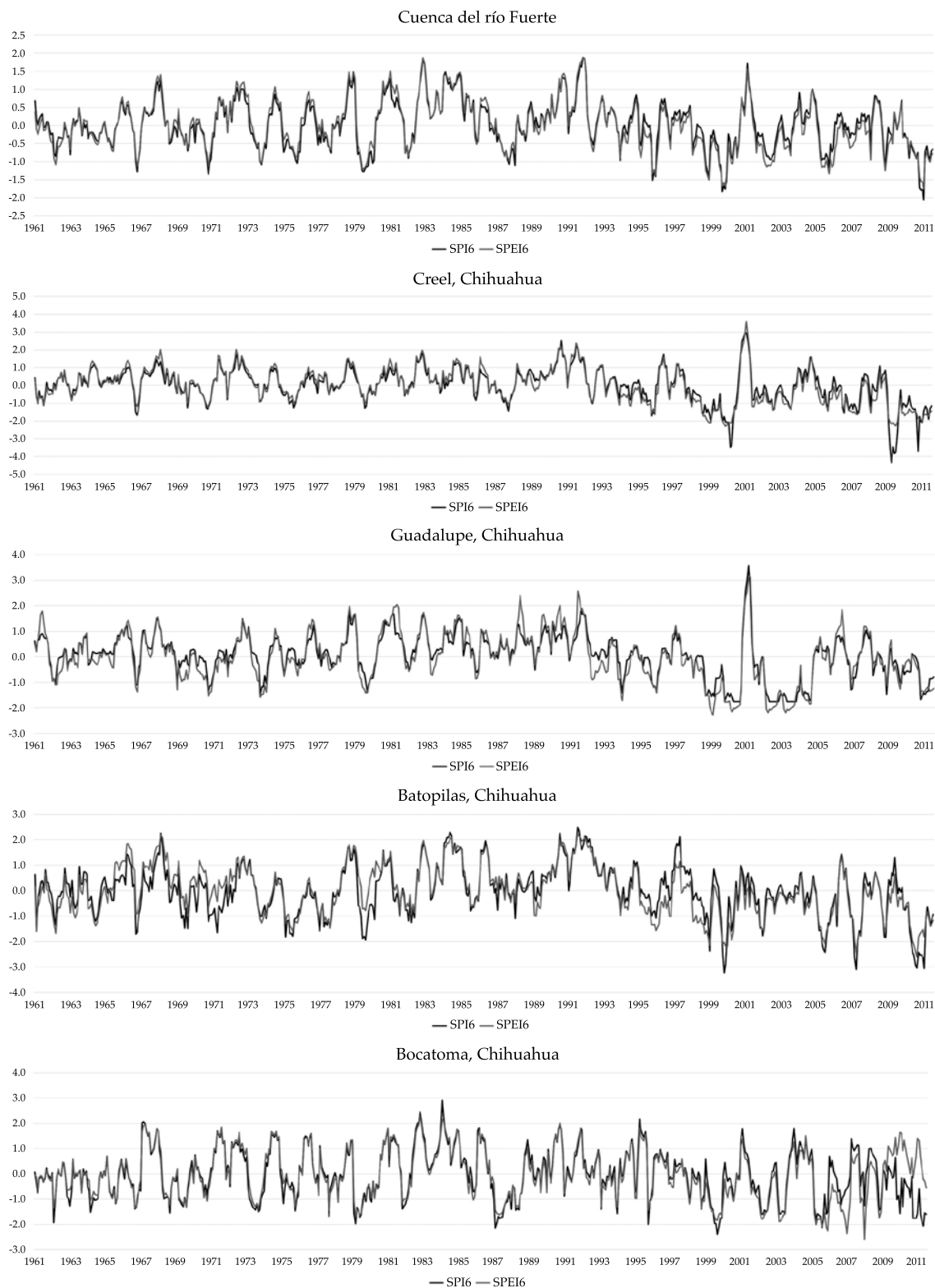


Figura 6. SPI y SPEI de seis meses para la cuenca del río Fuerte y para la parte alta (Creel y Guadalupe), media y baja.

el índice se mueve frecuentemente por arriba y debajo de cero. En cambio, cuando el periodo de tiempo se alarga a 12 y 24 meses, el índice responde con más lentitud a los cambios en la precipitación y temperatura, y los periodos secos y húmedos se hacen menos frecuentes, pero son más duraderos.

El SPI y SPEI de 12 meses muestran series más estables. Como ya se señaló, los periodos de sequía son menores, pero de mayor duración. A una escala de 12 meses, los valores de los índices cambian de modo lento. El SPEI, al final de la serie, muestra mayor intensidad en los periodos secos y un retraso en su aparición debido a que la reducción en la precipitación (variable de entrada del SPI) se presenta antes que el aumento de las temperaturas (variable de entrada del SPEI para calcular la PET), por lo que se tiene un desfase en la ocurrencia de las sequías (figura 7).

Al norte de la parte alta de la cuenca, la estación Creel, con una lámina de precipitación anual menor que Guadalupe, que se ubica al sur de la parte alta, presenta eventos secos extremos más intensos entre 1999 y 2011 que esta última. Los índices oscilan entre -5.0 y 3.0 en Creel, mientras que en Guadalupe se dan entre -3.0 y 3.0. En la parte media, la estación de Batopilas mostró eventos secos extremos de menor intensidad que Creel en el mismo periodo al final de la serie. Por su parte, el SPEI en Batopilas continúa mostrando al final de la serie mayor intensidad de los eventos secos y húmedos.

En la figura 8, a una escala temporal de 24 meses, el SPI y SPEI presentan diferencias más notables en la intensidad de los eventos secos y su ocurrencia. De manera general, continúa observándose al final de la serie que el SPEI señala condiciones de mayor déficit de humedad que el SPI, debido no sólo a la reducción de lámina precipitada en la última década, sino al incremento de la temperatura máxima, observándose predominancia de sequías de moderadas a severas en la cuenca. En las estaciones de la parte alta se observan periodos secos extremos entre 2000 y 2004, donde el SPI señala mayor intensidad que el SPEI; a esta escala, las series

de ambas estaciones oscilan por debajo de -3.0 y por arriba de 2.0. En Batopilas, la serie termina en un periodo extremo de sequía al igual que Bocatoma, aunque en esta última sólo es señalada por el SPI, esto puede deberse a que la PET no fue tan alta para generar balances de humedad negativos durante ese periodo.

La mayor ocurrencia de sequías se presentó a partir de 1999 en todas las escalas temporales de ambos índices; pero, en general, se identifican dos periodos intensos de sequía en la cuenca: de 1999 a 2004 y de 2011 en adelante. Los tiempos reportados como sequía coinciden con los de Sthale *et al.* (2009) sobre la sequía en México, quienes señalan que la amplia y persistente sequía sobre el noroeste de México comenzó en 1994 y se mantuvo hasta 2009, haciéndola parecer la sequía más grave, sostenida y generalizada de todo el país. También, en Estados Unidos, Hao y AghaKouchak (2014) reportan que se identifican dos periodos de sequía recientes: 2007 y 2012. En 2007 se vieron afectados los estados de California, Missouri, Alabama y Florida. En 2012 se afectó toda la parte Central de Estados Unidos, incluyendo el estado de Texas; Hao y AghaKouchak (2014) usaron los índices SPI, Standardized Soil Moisture Index (SSI) y Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) a 3 y 6 meses de escala.

Estudios sobre sequías en otras partes del mundo muestran comportamientos similares. Bakhtawar, Zhang, Feng, Han y Kabo-Bah (2015), en su estudio sobre la tendencia de las sequías y la influencia de la temperatura en la cuenca del río Zhanghe, en China, mediante el SPEI, encontraron que la ocurrencia de periodos secos se incrementó a lo largo de la última década (2000-2010); Xu-Chun, Li, Li, Xu y Zhang (2015), en su investigación sobre las condiciones del lago Poyang, China, con el SPI y SPEI mostraron que la ocurrencia de condiciones secas se han incrementado en la últimas dos décadas.

De igual manera, Edossa, Woyessa y Welderufael (2014), en su análisis de sequía en Sudáfrica con el SPEI y su asociación con el ENSO, refieren en sus resultados que el número de sequías moderadas, severas, y extremas identificados



Figura 7. SPI y SPEI de 12 meses para la cuenca del río Fuerte y la parte alta (Creel y Guadalupe), media y baja.



Figura 8. SPI y SPEI de 24 meses para la cuenca del río Fuerte y la parte alta (Creel y Guadalupe), media y baja.

por el índice siguen una tendencia de aumento en cada década del periodo de análisis. Manatsa, Mukwada, Siziba y Chinyanganya (2010), en su análisis de los aspectos multidimensionales de las sequías agrícolas en Zimbabwe, usando el SPI, indican en sus resultados que las sequías severas y extremas tienden a concentrarse cerca del final de las series de tiempo.

El cuadro 3 muestra las estadísticas de las series del SPI y SPEI medio en la cuenca del río Fuerte, donde se observa que la media es cercana a cero en todas las series, como fue señalado por Edwards y McKee (1997), y Vicente *et al.* (2010). En el procedimiento para la estimación de los índices, al ser transformadas las fdp gamma y log-logística, respectivamente, a una fdp normal estándar, el valor del SPI y SPEI tendrá como media cero.

Las escalas pequeñas presentan periodos secos y húmedos más intensos, los cuales se van reduciendo conforme se avanza en la escala temporal. La intensidad máxima de una sequía en la cuenca se presentó para el SPI de seis meses, con un valor de -2.05. La desviación estándar oscila entre 0.63 y 0.72, y dados los valores de la media, las condiciones de la cuenca se mantienen dentro de la categoría "Cercano a la normal".

La ocurrencia de sequías en la cuenca del río Fuerte definida mediante los índices SPI y SPEI a escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses se presenta a continuación.

El SPI de tres meses presentó 11 periodos de sequía moderada y dos con sequía extrema. La

sequía más intensa se presentó de 1999 a 2000 con una duración de siete meses. El SPEI de tres meses definió 15 periodos de sequía moderada y tres con severa, con patrones de ocurrencia a inicios de la serie de menor intensidad que el SPI. Las sequías a partir de 1999 son más intensas y de mayor duración; la sequía de mayor intensidad ocurrió de 1999 a 2000 y duró siete meses.

El SPI de seis meses presentó ocho periodos de sequía moderada, dos con sequía severa y una con sequía extrema al final de la serie. Las sequías severas empiezan a presentarse a partir de 1996 y aumentan considerablemente su intensidad y duración en los años siguientes. El SPEI de seis meses definió nueve sequías moderadas y dos severas. La sequía más intensa se presentó en 2011 y su duración se extendió después del periodo de estudio.

El SPI de 12 meses mostró cinco periodos de sequía moderada y una con sequía severa; por su parte, el SPEI identificó cuatro periodos de sequía moderada y una con severa. La sequía más intensa se presentó en agosto de 2000 para ambos índices.

El SPI de 24 meses presentó tres periodos de sequía moderada, con incremento en su intensidad hacia años recientes, y una sequía severa de dos años de duración. La primera sequía mostrada por el SPI a esta escala tuvo una duración de 20 meses y se presentó en 1988. El SPEI de 24 meses identificó dos periodos de sequía moderada y una con severa; esta última ocurrió en 1999 y duró 61 meses.

Cuadro 3. Estadísticas del SPI y SPEI a diferentes escalas temporales en la cuenca del río Fuerte.

Índice-escala temporal	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
SPI 3	0.06	-1.58	2.19	0.67
SPEI 3	0.01	-1.59	2.01	0.72
SPI 6	0.03	-2.05	1.88	0.66
SPEI 6	0.00	-1.74	1.88	0.70
SPI 12	0.02	-1.67	1.62	0.63
SPEI 12	0.01	-1.69	1.70	0.68
SPI 24	0.02	-1.63	1.71	0.63
SPEI 24	0.01	-1.66	1.76	0.67

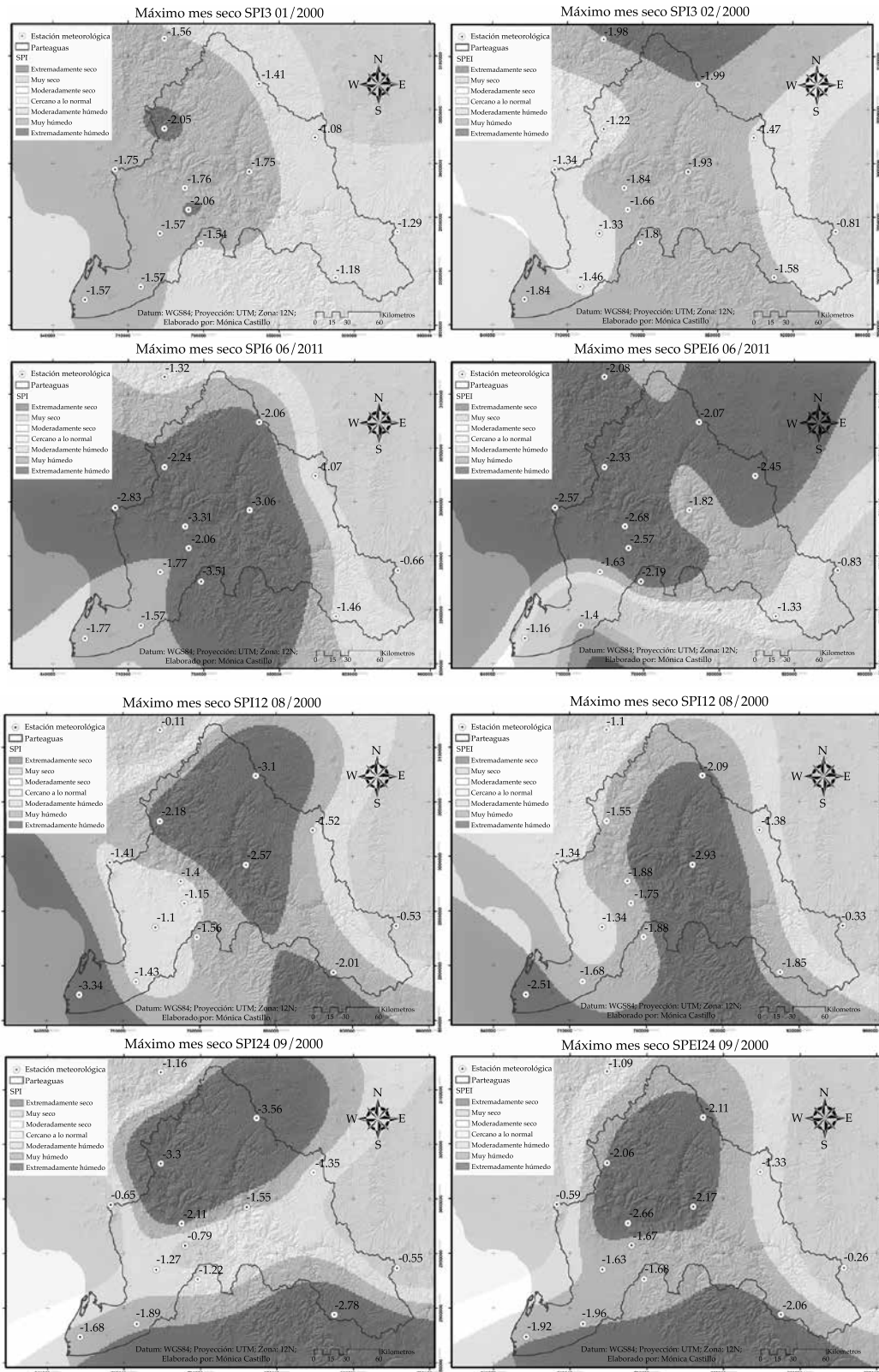


Figura 9. Distribución espacial de los meses con sequía más intensa para el SPI y SPEI a diversas escalas temporales.

La figura 9 muestra la distribución espacial del SPI y SPEI durante el mes más seco en cada escala temporal, para 3, 12 y 24 meses. El estado de sequía más intenso ocurrió en el periodo de 1999 a 2004; para la escala de seis meses se presentó del año 2011 en adelante. Torrecillas, Miguel y Ravelo (2013), con el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN) obtuvieron que de 1999 a 2008 se presentó sequía severa en Chihuahua, y sequía extrema en Sinaloa; la situación más crítica se tuvo de 2011 a 2013, con mayor impacto en la cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa. Ravelo, Sanz y Douriet (2014) señalan que mediante el SPI 12 y el PDSI en el OCPN, en el periodo 2011-2012 se presentó la sequía más extrema en la zona de estudio.

Los meses de mayor intensidad de la sequía indican que la parte alta y media de la cuenca son las más afectadas por las sequías. Ravelo *et al.* (2014), en su estudio sobre sequías en el OCPN, mediante el SPI de escala 12 y el PDSI, encontraron que durante la sequía más extrema en la zona de estudio se presentaron condiciones de sequía extrema en la parte alta y sequía moderada en la parte baja de la cuenca.

En el análisis temporal de los índices SPI y SPEI se encontró que las sequías han aumentado su intensidad y severidad en las últimas dos décadas, siendo así que a partir del año 1998 se presentan sequías de categorías severas y extremas.

Debido a la falta de información climatológica de buena calidad y la gran cantidad de estaciones suspendidas en las partes altas de la cuenca, no fue posible extender el periodo de análisis de esta investigación para detectar los estados de sequía extrema de los años 2012 y 2013 a los que refieren los autores citados anteriormente y los medios de comunicación, pues los valores de los índices SPI y SPEI para todas las escalas temporales indican sequía de moderada a severa en 2011 y se mantiene en ese estado hasta el final de la serie, por lo que se supone que continúa con condiciones similares en los meses posteriores.

Conclusiones

Se obtuvieron las series de los índices de sequía SPI y SPEI a cuatro escalas temporales para 14 estaciones de la cuenca del río Fuerte durante el periodo de 1961 a 2012. El índice SPEI aportó un nuevo enfoque de la ocurrencia de las sequías en el área de estudio, debido a que su comportamiento reflejó los efectos de los cambios climáticos, al considerar la temperatura de las últimas décadas y demostró una clara tendencia del incremento en el número, intensidad, severidad y duración de las sequías.

El SPEI define mejor los periodos de sequía, los cuales están plenamente vinculados con los cambios estacionales de la temperatura, la cual, además, controla su comportamiento, permitiendo establecer el inicio, término, duración y magnitud de los periodos secos más fácilmente que el SPI. Es por ello que en todas las escalas temporales, el SPEI presentó menor cantidad de periodos con sequía, así como una menor intensidad de estos periodos.

Dada la importancia del sector agrícola en la cuenca del río Fuerte, el SPEI y su sensibilidad a los cambios globales y locales de la temperatura que estima la demanda evaporativa, se convierte en una valiosa herramienta para la prevención, monitoreo y mitigación de la sequía en esta región, muy vulnerable a este fenómeno; además, el SPEI puede servir de referente para la toma de decisiones sobre los patrones de cultivo y la asignación de los recursos hídricos en los distritos de riego, a fin de minimizar los efectos adversos, priorizando los sectores estratégicos ante situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequías.

El número de sequías que se presentaron en las series de los índices SPI y SPEI se redujeron a medida que aumentaba la escala temporal del índice. Las escalas de 3 y 6 meses presentaron eventos de sequía de moderada a extrema de corta y mediana duración; en cambio, a escala de 12 y 24 meses, presentaron sequías moderadas y severas, con una duración de hasta 61 meses (SPEI 24).

El estudio de la distribución de la sequía en la cuenca del río Fuerte muestra que las áreas más afectadas por este fenómeno se encuentran en la parte alta y media de la cuenca; pero ello pudiera poner en riesgo también las actividades agrícolas de la parte baja, al poder disminuir la captación de agua de parte de las presas y afectar la generación de energía eléctrica.

El uso de dos índices de sequía permitió un análisis complementario de la variabilidad espacial y temporal de las sequías. Sin embargo, la gravedad de los efectos de la sequía y su intensificación en el futuro requiere de acciones y el esfuerzo conjunto de todos los sectores de la población, de los diferentes niveles de gobierno y de las instituciones de educación e investigación.

Referencias

- Al-Qinna, M., Hammouri, N. A., Obeidat, M. M., & Ahmad, F. Y. (2010). Drought analysis in Jordan current and future climates. *Climatic Change J.* (Springer). DOI: 10.07/s10584-010-9954-y.
- Bakhtawar, W., Zhang, Z., Feng, B., Han, S., & Kabo-Bah, A. T. (2015). Drought trends and temperature influence in Zhanghe River Basin, China. *Advances in Meteorology*. DOI: 10.1155/2015/160953.
- Beguiría, S., & Vicente, S. (2014). *Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Package SPEI.R for R or RStudio Program*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., & Rossi, G. (2003). Spatial variability of Drought: An analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17, 273-296.
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (3ª ed.) (500 pp.). San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Conagua (2010). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua (2014). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca ríos Fuerte y Sinaloa* (pp. 262). México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua (2015a). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2013-2014* (408 pp.). México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua (2015b). *Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA)*. Recuperado de <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>.
- Edossa, D., Woyessa, Y., & Welderufael, W. (2014). Analysis of droughts in the Central Region of South Africa and their association with SST anomalies. *International Journal of Atmospheric Sciences*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/508953>.
- Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales* (174 pp.). Atmospheric Science Paper # 634, Climatology Report No. 97-2. Fort Collins, USA: Department of Atmospheric Science, Colorado State University. Recuperado de <http://ccc.atmos.colostate.edu/edwards.pdf>.
- El Informador (2012). Sequía en Chihuahua traducida en un desastre social, dice Greenpeace. *El Informador*. Publicado el 7 de junio del 2012. Recuperado de <http://www.informador.com.mx/mexico/2012/381819/6/sequia-en-chihuahua-traducida-en-un-desastre-social-dice-greenpeace.htm>.
- Escalante, C., & Reyes, L. (2005). *Análisis de sequías* (1110 pp.). México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- ESRI (2012). *ArcGIS® Desktop*. Release 10.1. Redlands, USA: ESRI.
- Gobierno del Estado de Chihuahua (2012). *Segundo Informe de Gobierno 2010-2016. Informe Ejecutivo* (134 pp.). Chihuahua: Gobierno del Estado de Chihuahua.
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2014). A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 89-101. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0160.1. UC Irvine. Recuperado de <http://escholarship.org/uc/item/2gj7q5qr>.
- IMTA (2009). *Extractor Rápido de Información Climática, ERIC III Versión 2.0*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI (2014). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM 3.0*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevaciones.aspx>.
- La Jornada (2012). Sequía en Chihuahua. Publicado el 25 de Enero del 2012. *La Jornada*. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2012/01/25/politica/008n1pol>.
- Manatsa, D., Mukwada, G., Siziba, E., & Chinyanganya, T. (2010). Analysis of multidimensional aspects in Zimbabwe using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical Applied Climatology*, 102, 287-305.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales* (pp. 179-184). Eight Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American Meteorological Society.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. Elsevier, *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- NDMC (2014). *SPI SL 6.exe: Program to calculate Standardized Precipitation Index*. National Drought Mitigation

- Center. Recuperado de <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.
- OMM (2013). *El estado del clima mundial 2000-2010* (18 pp.). Geneva: Organización Meteorológica Mundial.
- Pronacose (2014). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejos de Cuenca Río Fuerte y Sinaloa* (262 pp.). México, DF: Programa Nacional Contra la Sequía, Semarnat-Conagua.
- Ravelo, A. C., Sanz, R., & Douriet, J. C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *AgriScientia Córdoba*, 31(1), 11-24. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2014000100002.
- RStudio, Inc. (2014). *RStudio® Version 0.98.1102*. Boston: RStudio, Inc.
- SMN (2014). *Red de Estaciones Climatológicas. Climatología diaria*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.
- SMN (2015). *Monitor de sequía de México*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=74.
- Sihale, D. W., Cook, E. R., Villanueva, D. J., Fye, F. K., Burnette, R. D., Griffin, R. D., Acuña, S. R., Seager, R., & Heim, Jr. (2009). Early 21st-Century Drought in Mexico. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 90(11):89-90.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Torrecillas, C. E., Miguel, A. J., & Ravelo, A. (abril-diciembre, 2013). Proyecto de coordinación, seguimiento, supervisión, integración y análisis del programa de medidas para prevenir y enfrentar la sequía. Etapa 1 de 6: Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) en el Consejo de Cuenca Presidio al San Pedro, Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte, Comisión Nacional del Agua, Sinaloa. Culiacán, México: Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Velasco, I., Aparicio J., Valdés, J. B., Velázquez, J., & Kim T. (julio-septiembre, 2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. *Ingeniería Hidráulica en México*, 19(3), 37-53.
- Vicente, S. S., Beguería, S., & López, M. J. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, 1696-1718.
- WMO (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide* (24 pp.). Geneva: World Meteorological Organization.
- Xu-Chun, Y., Li, Y. L., Li, X. H., Xu, C. Y., & Zhang, Q. (2015). Investigation of the variability and implications of meteorological dry/wet conditions in the Poyang Lake Catchment, China, during the period 1960-2010. *Advances in Meteorology*. DOI: 10.1155/2015/928534.

Dirección institucional de los autores

Ing. Mónica Castillo Castillo
 Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo
 Dr. Ramón Arteaga Ramírez
 Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

Universidad Autónoma Chapingo
 Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
 Km. 38.5 Carretera México-Texcoco
 56230 Chapingo, Estado de México, MÉXICO
 Teléfono: +52 (595) 952 1551
castillo.monik@gmail.com
libacas@gmail.com
arteagar@correo.chapingo.mx
mvazquezp@correo.chapingo.mx

Dr. Juan B. Valdés

The University of Arizona
 Hydrology and Water Resources
 United States of America
 1133 James E. Rogers
 Harshbarger Bldg. Room 318E
 Tucson AZ 85721, USA
jvaldes@email.arizona.edu