

Cuantificación con el SPEI de Sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México

Quantification with SPEI of historical Droughts and under probable climatic change in the climatological station Zacatecas, Mexico

Daniel Francisco Campos Aranda¹

¹Profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.

Autor para correspondencia: Daniel Francisco Campos-Aranda, campos_aranda@hotmail.com

Resumen

El SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) es una variante del ampliamente difundido SPI (Standardized Precipitation Index), que tiene un mayor potencial como *índice de sequías* al ser sensitivo al cambio climático, debido a que usa una medida más real de la disponibilidad de agua, el *balance climático*. Esta medida se evalúa con la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial mensuales. En este estudio se describe con detalle el procedimiento operativo del SPEI y se aplica a los registros históricos mensuales disponibles de precipitación y temperatura media en la estación climatológica Zacatecas, ubicada en la capital del estado de Zacatecas, México, los cuales abarcan 86 años (1930-2015). Para las *sequías históricas*, los resultados del SPEI definen en las sequías leves, moderadas, severas y extremas, los valores aproximados siguientes: 32.2%, 11.5%, 5.0% y 1.3%. Para esta ubicación del país, se consideró conveniente formular tres escenarios del *cambio climático*, el primero

acepta una reducción progresiva y lineal del 20% en la precipitación anual, el segundo adopta un aumento progresivo y lineal de 4°C en la temperatura media anual y el tercero, sobrepone los dos efectos citados; por lo tanto es el más crítico. En los tres escenarios planteados, se encuentra que las sequías leves y extremas aumentan someramente en número o porcentaje y que las sequías moderadas y severas disminuyen, también de manera mesurada. Se exponen los gráficos de evolución del SPEI de duración 12 meses, histórico y del tercer escenario, en los cuales se visualiza claramente las épocas de ocurrencia de los periodos de sequía, así como de las diferencias puntuales en el valor del SPEI. Con base en los resultados de estos análisis, se recomienda la aplicación sistemática del SPEI en la caracterización de las sequías históricas y *futuras*. En estas últimas, los resultados tienen únicamente un carácter orientativo.

Palabras clave: índice SPEI, distribución Log-Logística, momentos de probabilidad ponderada, evapotranspiración potencial, homogeneidad estadística, cambio climático.

Abstract

The SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) is a variant of the widespread SPI (Standardized Precipitation Index), it has greater potential as *drought index* since it is sensitive to climate change because it uses a more realistic measure of the water availability: the *climate balance*. This measure is evaluated by the difference between monthly precipitation and potential evapotranspiration. This study describes in detail the calculation of SPEI and its application to the monthly historical records of precipitation and average temperature available in the climatological station Zacatecas, located in the capital of the state of Zacatecas, Mexico. The data covers 86 years in the period from 1930 to 2015. For *historical droughts*, the results of SPEI indicate in light, moderate, severe and extreme droughts, the following approximate values: 32.2%, 11.5%, 5.0% and 1.3%. For this particular location, three scenarios of *climatic change* were proposed; the first one accepts a progressive and linear reduction of 20% in annual precipitation, the second one adopts a progressive and linear increase of 4 °C in the average temperature and finally, the third one, superimposes the two effects mentioned; being therefore the most critical. For the three proposed scenarios, results suggest that light and extreme droughts increase scarcely in number or percentage, and that moderate and severe droughts decrease, also in a slight way. Results are condensed on graphs of SPEI evolution of duration 12 months,

historical and the third scenario, in which the times of occurrence of drought periods are clearly displayed, as well as the specific differences in the value of SPEI exposed. Based on these analyzes, the systematic application of SPEI in the characterization of historical and *future droughts* is recommended, its application on future droughts would lead to results merely indicative.

Keywords: SPEI index, Log-Logistic distribution, probability weighted moments, potential evapotranspiration, statistical homogeneity, climate change.

Fecha de recibido: 30/03/2016

Fecha de aceptado: 02/04/2017

Introducción y Objetivo

Las *sequías* son una de las causas naturales principales de daños en la agricultura, en las actividades económicas y en el medio ambiente. Las sequías aparecen después de largos periodos de precipitación escasa y debido a su evolución lenta, es difícil precisar su inicio y final, así como estimar sus características de magnitud, duración y extensión territorial. Por otra parte, debido al crecimiento sostenido de la demanda de agua para todos los usos y a la amenaza del cambio climático, en años recientes se ha intensificado el estudio de las sequías (Mishra & Singh, 2010; Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010).

Como las sequías son un fenómeno y amenaza natural, su mejor caracterización se lleva a cabo empleando *indicadores* que son variables climáticas, hidrológicas, agrícolas y/o socio-económicas que muestran numéricamente el potencial de las sequías en relación con las deficiencias y daños que producen. Un *índice de sequías* es un método basado en cálculos estadísticos que emplea indicadores y busca cuantificar las sequías, permitiendo con ello su comparación en climas y regímenes hidrológicos disímiles; además favorecen el desarrollo de

acciones de mitigación correctas y eficientes de sus impactos negativos (Mishra & Singh, 2010; Fuchs, Svoboda, Wilhite, & Hayes, 2014).

Otro aspecto importante de las sequías es su carácter de múltiples escalas de tiempo (*multiescalar*), lo cual se origina por los *retrasos* que ocurren en el aprovechamiento del agua en los diferentes sistemas hidráulicos, de manera que las deficiencias de la precipitación primeramente son visibles en la agricultura de temporal, después en el abastecimiento del riego, generación de energía hidroeléctrica y otros usos del agua y por último, en los impactos sociales, económicos y ambientales. Por lo anterior, las sequías se clasifican como: *meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socio-económicas*. Estas últimas, incluyen los daños ambientales (Pandey, Sharma, Mishra, Singh, & Agarwal, 2008; Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Fuchs *et al.*, 2014).

Desde finales del siglo pasado, los estudios de sequías y el desarrollo de sus sistemas de alerta y monitoreo, se han basado en el PDSI (Palmer Drought Severity Index) y el SPI (Standardized Precipitation Index); el primero basado en un balance de humedad en el suelo (Palmer, 1965; Wells, Goddard, & Hayes, 2004) y el segundo en un enfoque probabilístico de la precipitación (McKee, Doesken, & Kleist, 1993; Wu, Svoboda, Hayes, Wilhite, & Wen, 2007). El PDSI ha sido criticado por no tener carácter multiescalar en el tiempo ni un cálculo simple, además de no ser suficientemente sensitivo a los cambios inducidos en la precipitación y la temperatura. El SPI ha mostrado un uso eficiente de la información disponible y su crítica principal consiste en utilizar únicamente datos de precipitación mensual, ignorando con ello otros indicadores de las sequías, como la temperatura y la evapotranspiración potencial.

Siendo las sequías un fenómeno natural complejo y de impactos amplios, recientemente se ha buscado su caracterización a través de índices basados en múltiples variables. Hao y Singh (2015) describen los diversos enfoques de construcción de los *índices multivariados*, entre los más conocidos están el uso del balance hídrico edafológico y de las *variables ocultas* o latentes. Una variable oculta se forma con una diferencia o cociente de variables que tienen gran significado físico en las sequías; por ejemplo, la precipitación y la evapotranspiración potencial y así se propuso el RDI (Reconnaissance Drought Index) con el cociente de tales variables (Tsakiris & Vangelis, 2005; Campos-Aranda, 2015) y el SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) con su diferencia, que implica una condición de déficit o exceso de agua. El SPEI es un nuevo índice de sequías propuesto por Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Beguería, Vicente-Serrano, Reig y Latorre (2014) de cálculo

similar al SPI, que es multiescalar y sensitivo a las alteraciones inducidas en los registros históricos de precipitación y temperatura, de acuerdo a las expectativas que presenta el cambio climático en tal zona o región. Una aplicación del SPEI con tal enfoque, ha sido expuesta por Törnros y Menzel (2014) para una zona de medio oriente.

El *objetivo* de este estudio consiste en describir con detalle el procedimiento operativo del SPEI y realizar su aplicación en el registro histórico disponible de precipitación y temperatura media de la estación climatológica Zacatecas, localizada en la ciudad capital del mismo nombre del estado de Zacatecas, México. Tal registro abarca 86 años en el lapso de 1930 a 2015. Se procesaron nueve duraciones de sequía, que variaron de 3 a 48 meses y se analizan tres escenarios para el cambio climático probable, el primero considera una reducción progresiva y lineal que alcanza un 20% de la precipitación anual, el segundo adopta un aumento progresivo y lineal que llega a los 4°C en la temperatura media anual y el tercero, el más crítico, combina los efectos negativos de ambas alteraciones. Con base en los porcentajes que define el SPEI para las sequías leves, moderadas, severas y extremas, se realiza el contraste de resultados y se formulan las conclusiones.

Resumen de la Teoría Operativa

Cálculo del SPEI

El SPI ha sido aplicado utilizando diversas *duraciones k* de sequías, que variaron de 3 a 72 meses (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). El registro de precipitación mensual se procesa bajo el esquema de *sumas móviles*, de manera que para la duración de 3 meses, la primera secuencia se obtiene sumando los datos históricos uno, dos y tres, la segunda secuencia es la suma de los datos dos, tres y cuatro y así sucesivamente

hasta la última secuencia, que la forman los datos antepenúltimo, penúltimo y último. Entonces, el número de secuencias ns que se pueden formar depende de k y está definido por la expresión:

$$ns = 12 \cdot NA - k + 1 \quad (1)$$

en la cual, NA es el número de años completos del registro procesado (> 30 años). La diferencia fundamental entre el cálculo del SPI y del SPEI radica en que el segundo emplea como datos históricos las diferencias ($D_{j,i}$) entre la precipitación mensual ($P_{j,i}$) y la evapotranspiración potencial mensual ($ETP_{j,i}$), esto es:

$$D_{j,i} = P_{j,i} - ETP_{j,i} \quad (2)$$

Lógicamente, j varía de uno a 12 e i de uno a NA . Para proseguir con el cálculo del SPEI primeramente se forman las secuencias de diferencias designadas por D_t^k , en las cuales t varía de uno a ns . Al tomar en cuenta, que las diferencias D_t^k la mayoría son negativas, surge la necesidad de emplear un modelo probabilístico de tres parámetros de ajuste, cuyo parámetro de ubicación u sea menor que la más pequeña de las secuencias por procesar. Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Beguería *et al.* (2014) contrastaron cuatro distribuciones: Log-Normal, Pearson tipo III, General de valores Extremos y Log-Logística; recomiendan la última, ajustada mediante el método de los momentos de probabilidad ponderada (β_s) sesgados, cuyas ecuaciones son (Stedinger, Vogel, & Foufoula-Georgiou, 1993; Vicente-Serrano *et al.*, 2010):

$$\beta_s = \frac{1}{ns} \sum_{l=1}^{ns} (1 - F_l)^s \cdot D_l^k \quad \text{con } s = 0, 1, 2, \quad (3)$$

siendo:

$$F_l = \frac{l-0.35}{ns} \quad (4)$$

En la ecuación 3 las secuencias se utilizan ordenadas en forma creciente. $(D_1^k \leq D_2^k \leq \Lambda \leq D_{ns}^k)$ Beguería *et al.* (2014) han propuesto utilizar los β_s insesgados, cuando los estimadores sesgados no conducen a una solución numérica. Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon, & Stahl (2015) han sugerido utilizar la distribución General de Valores Extremos, ajustada con el método de máxima verosimilitud. La ecuación de la función de distribución de probabilidades acumuladas $[F(x)]$ de la distribución Log-Logística (LL3) es (Haktanir, 1991):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x-u}{a} \right)^{-1/\gamma} \right]^{-1} \quad (5)$$

siendo, $\gamma > 0$, $a > 0$ y $u < x_{mo}$ los parámetros de forma, escala y ubicación. x_{mo} es la secuencia mínima observada. Los valores de los parámetros de ajuste se estiman con las expresiones siguientes (Haktanir, 1991):

$$\gamma = 3 - \frac{2 \cdot (\beta_0 - 3 \cdot \beta_2)}{(\beta_0 - 2 \cdot \beta_1)} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{(\beta_0 - 2 \cdot \beta_1)}{\gamma \cdot \Gamma(1+\gamma) \cdot \Gamma(1-\gamma)} \quad (7)$$

$$u = \beta_0 - \alpha \cdot \Gamma(1+\gamma) \cdot \Gamma(1-\gamma) \quad (8)$$

en las cuales, $\Gamma(\cdot)$ es la función factorial Gamma, se estimó con la fórmula de Stirling (Davis, 1972):

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon} \varepsilon^{\varepsilon-1/2} \sqrt{2\pi} \left(1 + \frac{1}{12 \cdot \varepsilon} + \frac{1}{288 \cdot \varepsilon^2} - \frac{139}{51840 \cdot \varepsilon^3} - \frac{571}{2488320 \cdot \varepsilon^4} + \Lambda \right) \quad (9)$$

Calculados los tres parámetros de ajuste (γ , α , u) de cada duración k analizada, se aplica la ecuación 5 con $x = D_t^k$ para estimar las probabilidades de no excedencia $F(x)$ que corresponden a cada diferencia. Después se emplea la aproximación numérica racional, desarrollada por Zelen y Severo (1972) y expuesta por Campos-Aranda (2015), para convertir la $F(x)$ en la variable normal estandarizada Z de media cero y varianza unitaria, la cual corresponde al SPEI. Las sequías leves, moderadas, severas y extremas se definen cuando el SPEI varía de cero a -1.00, de -1.00 a -1.50, de -1.50 a -2.00 y cuando es menor que -2.00, respectivamente.

Cálculo de la *ETP* mensual

Mavromatis (2007) encontró que el uso de métodos simples o complejos para estimación de la $ETP_{j,i}$, conduce a resultados similares cuando se aplican índices de sequía como el de Palmer. Con base en tal resultado, Vicente-Serrano *et al.* (2010) adoptan un enfoque simple para estimar la $ETP_{j,i}$, a través de la fórmula de Thornthwaite, cuya expresión es:

$$ETP_{j,i} = 16 \cdot Fc \cdot \left(\frac{10 \cdot Tt_{j,i}}{IC_i} \right)^m \quad (10)$$

en la cual, Fc es un factor correctivo función de la latitud del lugar (LAT) y del número de días del mes (ndm), su fórmula es:

$$Fc = \left(\frac{N}{12} \right) \cdot \left(\frac{ndm}{30} \right) \quad (11)$$

en donde, N es el soleamiento máximo o número máximo de horas con sol promedio mensuales. Para su estimación en la República Mexicana, Campos-Aranda (2005) desarrolló la siguiente expresión empírica:

$$N = A + B [\text{sen}(30 \text{ nm} + 83.5)] \quad (12)$$

en la cual, nm es el número de mes, con 1 para enero y 12 para diciembre; A y B son constantes función de LAT en grados, con las expresiones siguientes:

$$A = 12.09086 + 0.00266 \cdot LAT \quad (13)$$

$$B = 0.2194 - 0.06988 \cdot LAT \quad (14)$$

$Tt_{j,i}$ es la temperatura media mensual en °C e IC_i es un índice de calor anual, igual a la suma de los 12 mensuales, que son:

$$icm = \left(\frac{Tt_{j,i}}{5}\right)^{1.514} \quad (15)$$

Finalmente, el exponente m es función de IC_i en la ecuación empírica:

$$m = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot IC_i^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot IC_i^2 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot IC_i + 0.4924 \quad (16)$$

Para valores de $Tt_{j,i}$ mayores de 26.5°C no existe influencia del IC_i , por lo cual la $ETP_{j,i}$ es solo función de $Tt_{j,i}$ y está tabulada en Campos-Aranda (2005).

Escenarios hipotéticos del cambio climático

Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Ma *et al.* (2014) han sugerido que como consecuencia de los procesos del cambio climático, se deben estudiar al menos dos escenarios, el primero es una reducción en la precipitación y el segundo, un aumento en la temperatura media. Con base en los análisis cuantitativos realizados por estos autores y las proyecciones climáticas para México de Montero, Martínez, Castillo y Espinoza (2010), se establecieron tres escenarios por analizar: (1) una reducción progresiva y lineal del 20% en la precipitación anual del registro histórico; (2) un aumento progresivo y lineal de 4°C en el registro de temperatura media anual y (3) la superposición de ambos cambios en el registro histórico. Los cambios citados tienen impacto directo en la severidad y duración de las sequías (Fuchs *et al.*, 2014). La corrección del registro mensual de precipitación ($PM_{j,i}$) se realiza con base en la ecuación siguiente:

$$PM_{j,i} = PM_{j,i} - (\Delta_p \cdot i \cdot PM_{j,i}) \quad (17)$$

en la cual, Δ_p es la pendiente de la reducción y por lo tanto igual al cociente de 0.20 entre el número de años NA e i es el contador de años, variando de 1 a NA. La corrección de registro de temperatura media mensual ($TM_{j,i}$) se efectúa con la ecuación:

$$TM_{j,i} = TM_{j,i} + (\Delta_T \cdot i) \quad (18)$$

donde, Δ_T es la pendiente del incremento, igual al cociente de 4°C entre NA.

Datos procesados y sus Resultados

Registros históricos disponibles

La estación climatológica Zacatecas, se ubica en la ciudad del mismo nombre, que es la capital del estado de Zacatecas, México, la cual de acuerdo a la información histórica proporcionada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ha operado continuamente y no ha sufrido cambios de ubicación, por lo cual su registro puede ser considerado confiable. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: latitud 22° 45' N., longitud 102° 34' W.G. y altitud 2485 m.s.n.m. Sus registros mensuales disponibles de precipitación (mm) y temperatura media (°C) en los archivos en Excel de la CONAGUA de Zacatecas, inician en enero de 1953 y están disponibles hasta diciembre de 2015, con datos faltantes en abril de 1986 y varios meses de los años 2010 a 2013.

Los primeros datos faltantes se adoptaron igual a las medias mensuales y los restantes se consideraron igual a los valores registrados en los mismos meses en la estación climatológica Guadalupe, que dista aproximadamente 6 km en línea recta y se ubica dentro de la misma subregión geográfica. Lo anterior se consideró aceptable debido a la similitud que muestran a nivel anual ambos registros, tanto en la precipitación como en la temperatura media. Por otra parte, en el Boletín Climatológico No. 3 (SARH, 1980) de la Región Hidrológica No. 37 (El Salado), los registros disponibles de la estación Zacatecas de precipitación y temperatura media mensuales inician en enero de 1930 y llegan hasta diciembre de 1978. Entonces, el lapso de enero de 1930 a diciembre de 1952, sin datos faltantes, se tomó de tal Boletín y con ello se integró un registro conjunto de NA = 86 años. Los doce valores promedio mensuales del registro integrado de precipitación son: 16.2, 9.6, 5.7, 7.5, 17.7, 80.0, 102.1, 97.9, 85.4, 35.4, 12.8 y 12.0, cuya suma es de 482.2 mm, magnitud que corresponde a la precipitación media anual. Los del registro de temperatura media mensual son: 11.7, 12.7, 14.8, 17.1, 19.0, 19.0, 17.5, 17.6, 17.0, 16.1, 14.1 y 12.3, con un valor promedio anual de 15.7 °C.

Pruebas de homogeneidad

A partir de los registros históricos mensuales se integraron los de valores anuales de precipitación y temperatura media, a los cuales se les aplicaron tres pruebas básicas (Helmert, Secuencias y Von Neumann) y seis específicas: dos de persistencia (Anderson y Sneyers), dos de tendencia (Kendall y Spearman), una de cambio en la variabilidad (Bartlett) y otra de cambio en la media, la de Cramer. Estas pruebas se pueden consultar en WMO (1971); Campos-Aranda (2005) y Machiwal y Jha (2012).

El registro de precipitación anual, es perfectamente homogéneo, ya que ninguna prueba general ni específica le detectó componentes determinísticas. En cambio, el registro de temperatura media anual resultó no homogéneo, según las pruebas básicas y de acuerdo a las específicas muestra persistencia y cambio en la media. Esta evidencia de falta de homogeneidad, justifica el planteamiento de los escenarios relativos al cambio climático.

Valores del SPEI con los registros históricos

Para este estudio se decidió analizar las siguientes nueve duraciones k de sequías: 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36 y 48 meses. En la Tabla 1 se han concentrado los resultados obtenidos con los registros históricos disponibles, para cada duración según cuatro conceptos: (1) los relativos a las propiedades estadísticas de las secuencias formadas, (2) los correspondientes al ajuste de la distribución Log-Logística, (3) los asociados a los indicadores estadísticos del SPEI y (4) los pertenecientes a los tipos de sequías definidas.

El primer grupo de resultados da idea de la variabilidad y sesgo de las secuencias formadas con el criterio de sumas móviles; de manera que el segundo grupo, que son los parámetros de ajuste de la distribución, están relacionados con tal comportamiento. El tercer grupo de resultados es el más importante, pues define la calidad del ajuste logrado y por lo tanto la confiabilidad de las estimaciones realizadas con el SPEI, ya que su media, varianza y porcentaje de sequías que define deben ser cero, la unidad y el 50%. Conforme tales indicadores se aproximen a los valores citados, la estimación será mejor o más confiable.

Con respecto a la Tabla 1, las estimaciones más exactas resultaron ser las de duraciones de 12, 24 y 36 meses, definiendo unos porcentajes aproximados del 32.2, 11.5, 5.0 y 1.3 de sequías leves, moderadas, severas y extremas, respectivamente. En la Figura 1a se muestra la evolución histórica del SPEI con duración de 12 meses, observando que en general se tiene una alternancia de lapsos húmedos y secos. La sequía de mayor duración inició hacia la secuencia 153 (septiembre de 1941) y concluyó en la 416 (agosto de 1963). La fecha que corresponde a una secuencia se obtiene despejando de la ecuación 1 el valor de NA en años, el cual se suma al año inicial del registro. En este lapso ocurre el valor del SPEI más extremo, con -2.742 en la secuencia 321 (octubre de 1954).

Tabla 1. Resultados del SPEI con los datos históricos de la estación climatológica Zacatecas, México.

| Conceptos numéricos: | Duración en meses de las secuencias analizadas | | | | | | | | |
|--------------------------|--|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 48 |
| <i>De las secuencias</i> | | | | | | | | | |
| Número de secuencias | 1030 | 1027 | 1024 | 1021 | 1015 | 1009 | 1003 | 997 | 985 |
| Suma móvil mínima | -255.0 | -389.6 | -513.3 | -668.6 | -867.1 | -1059.0 | -1322.5 | -1487.3 | -1923.4 |
| Suma móvil máxima | 385.4 | 398.7 | 352.1 | 284.2 | 429.7 | 295.2 | 310.5 | 43.8 | -276.6 |

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Media aritmética | -67.6 | -135.4 | -203.9 | -273.1 | -412.9 | -552.7 | -692.2 | -832.2 | -1110.7 |
| Desviación estándar | 100.2 | 135.0 | 150.4 | 156.4 | 214.5 | 234.5 | 278.2 | 289.4 | 337.9 |
| Coef. de asimetría | 1.000 | 0.799 | 0.640 | 0.548 | 0.525 | 0.539 | 0.546 | 0.451 | 0.234 |
| <i>De la FDP (LL3)</i> | | | | | | | | | |
| Parámetro de forma (γ) | 0.170 | 0.148 | 0.109 | 0.097 | 0.080 | 0.090 | 0.090 | 0.084 | 0.063 |
| Parámetro de escala (α) | 306.08 | 488.25 | 756.28 | 892.86 | 1488.13 | 1436.10 | 1701.99 | 1910.52 | 3054.05 |
| Parámetro de ubic. (u) | -388.3 | -641.0 | -974.3 | -1178.8 | -1915.2 | -2006.6 | -2415.2 | -2763.0 | -4181.4 |
| <i>Del SPEI</i> | | | | | | | | | |
| Media aritmética | -0.0008 | -0.0006 | -0.0033 | -0.0042 | -0.0061 | -0.0049 | -0.0050 | -0.0053 | -0.0070 |
| Varianza | 0.9994 | 0.9939 | 0.9956 | 0.9987 | 0.9966 | 0.9979 | 0.9980 | 1.0011 | 1.0079 |
| Valor mínimo | -2.438 | -2.287 | -2.311 | -2.742 | -2.247 | -2.334 | -2.445 | -2.405 | -2.408 |
| No. de valores negativos | 539 | 519 | 524 | 517 | 496 | 508 | 510 | 504 | 501 |
| % de sequías | 52.3 | 50.5 | 51.2 | 50.6 | 48.9 | 50.3 | 50.8 | 50.6 | 50.9 |
| <i>De los tipos de sequías</i> | | | | | | | | | |
| % de sequías leves | 36.2 | 32.0 | 33.5 | 32.8 | 29.4 | 32.0 | 33.6 | 33.0 | 29.7 |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| % de sequías moderadas | 8.5 | 12.2 | 10.6 | 11.8 | 13.3 | 11.3 | 10.7 | 11.4 | 17.5 |
| % de sequías severas | 6.0 | 5.6 | 5.8 | 4.8 | 5.2 | 5.7 | 4.9 | 4.2 | 2.1 |
| % de sequías extremas | 1.6 | 0.8 | 1.3 | 1.3 | 1.0 | 1.3 | 1.7 | 1.9 | 1.5 |

Tabla 2. Valores característicos anuales de los registros climáticos históricos y de sus versiones hipotéticas, en la estación climatológica Zacatecas, México.

| Registro anual de: | valor histórico | | mínimo | | máximo | | valor medio |
|--|-----------------|--------|--------|------|--------|------|-------------|
| | inicial | final | valor | año | valor | año | |
| Precipitación histórica (mm) | 630.9 | 1019.0 | 169.3 | 1969 | 1019.0 | 2015 | 482.2 |
| Temperatura media (°C) | 15.2 | 16.2 | 14.2 | 1985 | 16.8 | 1962 | 15.7 |
| <i>ETP</i> (mm) de Thornthwaite (THW) | 736.6 | 763.9 | 704.7 | 1985 | 792.9 | 1962 | 752.8 |
| Precip. con reducción del 20% (mm) | 629.4 | 815.2 | 145.3 | 2011 | 880.9 | 1935 | 432.9 |
| Temp. media con aumento a 4°C | 15.2 | 20.2 | 15.1 | 1931 | 20.4 | 2006 | 17.8 |
| <i>ETP</i> (mm) de THW y temp. con aumento | 738.1 | 950.7 | 735.5 | 1931 | 975.3 | 2006 | 833.6 |

Tabla 3. Resultados del SPEI con los registros mensuales alterados con efectos combinados, en la estación climatológica Zacatecas, México.

| Conceptos numéricos: | Duración en meses de las secuencias analizadas | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 48 |
| <i>De las secuencias</i> | | | | | | | | | |
| Número de secuencias | 1030 | 1027 | 1024 | 1021 | 1015 | 1009 | 1003 | 997 | 985 |
| Suma móvil mínima | -324.9 | -474.3 | -632.2 | -766.5 | -1143.5 | -1409.6 | -1827.0 | -2035.6 | -2487.3 |
| Suma móvil máxima | 374.1 | 382.3 | 278.9 | 165.0. | 395.9 | 259.6 | 265.5 | -4.2 | -347.8 |
| Media aritmética | -100.2 | -200.4 | -301.1 | -402.3 | -606.4 | -810.2 | -1013.7 | -1217.2 | -1622.9 |
| Desviación estándar | 92.8 | 127.1 | 147.8 | 161.3 | 225.3 | 261.8 | 315.6 | 349.8 | 435.1 |
| Coef. de asimetría | 0.858 | 0.799 | 0.658 | 0.586 | 0.671 | 0.663 | 0.639 | 0.596 | 0.542 |
| <i>De la FDP (LL3)</i> | | | | | | | | | |
| Parámetro de forma (γ) | 0.111 | 0.115 | 0.090 | 0.076 | 0.084 | 0.078 | 0.074 | 0.070 | 0.086 |
| Parámetro de escala (α) | 445.43 | 594.79 | 892.73 | 1164.48 | 1462.82 | 1816.87 | 2325.00 | 2725.99 | 2784.61 |
| Parámetro de ubic. (u) | -554.2 | -807.6 | -1204.9 | -1576.6 | -2084.64 | -2643.53 | -3357.2 | -3962.4 | -4438.5 |
| <i>Del SPEI</i> | | | | | | | | | |
| Media aritmética | -0.0053 | -0.0041 | -0.0062 | -0.0081 | -0.0070 | -0.0080 | -0.0085 | -0.0091 | -0.0061 |
| Varianza | 1.0015 | 0.9958 | 0.9968 | 0.9991 | 0.9989 | 0.9988 | 0.9990 | 0.9999 | 1.0001 |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valor mínimo | -2.810 | -2.486 | -2.444 | -2.401 | -2.569 | -2.453 | -2.700 | -2.456 | -2.154 |
| No. de valores negativos | 521 | 516 | 498 | 500 | 509 | 499 | 510 | 500 | 484 |
| % de sequías | 50.6 | 50.2 | 48.6 | 49.0 | 50.1 | 49.5 | 50.8 | 50.2 | 49.1 |
| <i>De los tipos de sequías</i> | | | | | | | | | |
| % de sequías leves | 34.3 | 33.6 | 29.7 | 30.4 | 33.1 | 32.3 | 33.1 | 32.1 | 30.8 |
| % de sequías moderadas | 8.7 | 9.6 | 12.0 | 11.4 | 9.9 | 10.9 | 10.1 | 9.8 | 10.2 |
| % de sequías severas | 4.9 | 5.6 | 5.4 | 5.3 | 5.0 | 4.5 | 6.2 | 7.1 | 7.2 |
| % de sequías extremas | 2.7 | 1.4 | 1.6 | 2.0 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.1 | 1.0 |

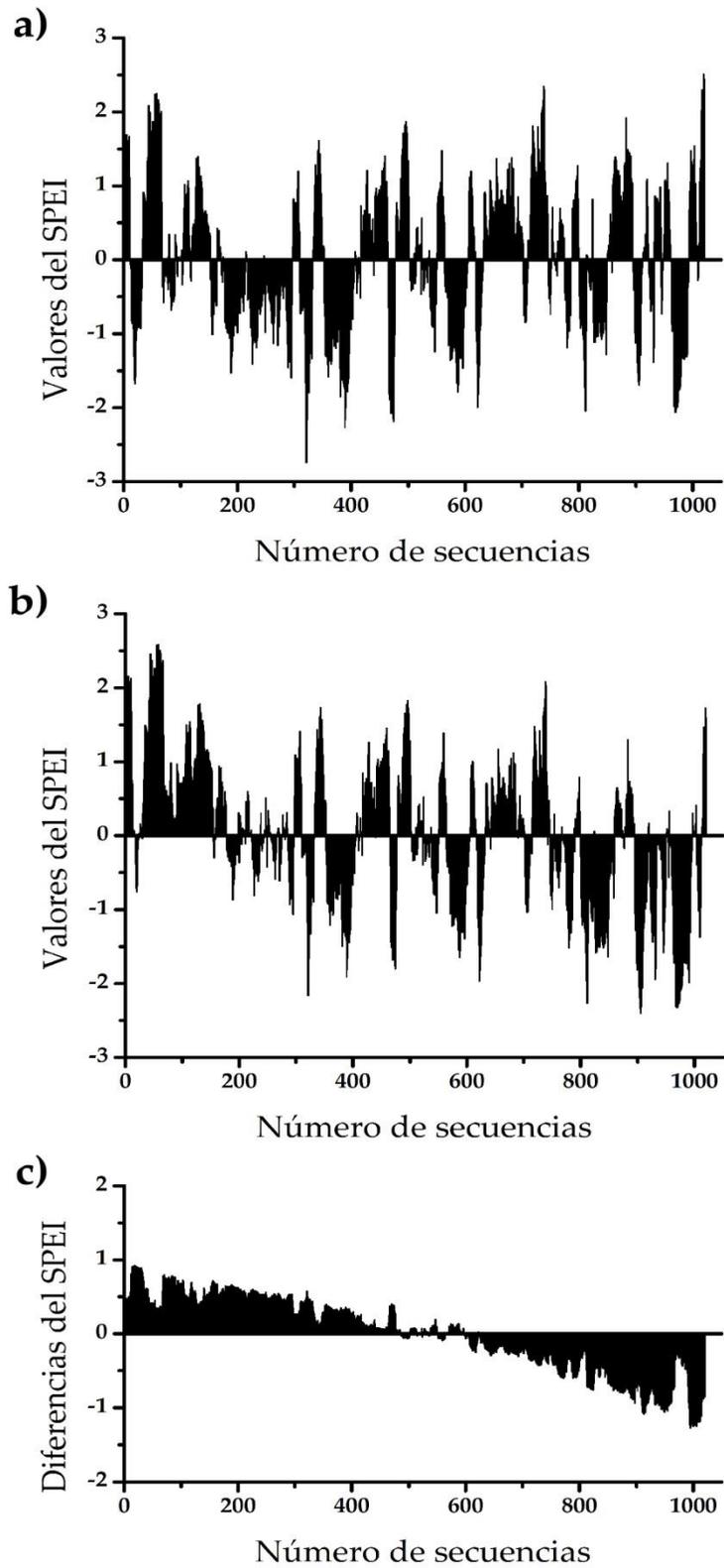


Figura 1. (a) Evolución del SPEI de duración 12 meses en la estación climatológica Zacatecas, del estado de Zacatecas, México; (b) Evolución del

SPEI ($k = 12$ meses) con reducción del 20% en la precipitación anual y aumento de 4°C en la temperatura media anual y (c) Diferencias entre los SPEI mostrados (b - c).

Valores del SPEI con los registros alterados

Con base en las ecuaciones 17 y 18 se modificaron los registros históricos para incorporar un decremento progresivo y lineal del 20% en la precipitación anual y un aumento también progresivo y lineal de 4°C en la temperatura media anual. En la Tabla 2 se citan diversos valores relevantes de los registros históricos y de los alterados o modificados según posible cambio climático, así como de los valores anuales de la *ETP* estimada con el método de Thornthwaite.

De manera similar a la Tabla 1, en la Tabla 3 se exponen los resultados del SPEI para el registro alterado según el tercer escenario, es decir, considerando el efecto combinado de ambas modificaciones. Por limitación de espacio no se muestran los resultados del SPEI con reducción de la precipitación, ni con aumento de la temperatura media, pero están disponibles con el autor.

Con base en todos los resultados del SPEI, se definió a la duración de 24 meses como la idónea para el contraste entre los valores obtenidos con el registro histórico y los alterados. Tal contraste se muestra en el Tabla 4.

Tabla 4. Número de eventos y porcentajes de cada tipo de sequía obtenidos con el SPEI de 24 meses de duración en los registros históricos (Tabla 2) y su contraste con los alterados (Tabla 3).

| Tipos de sequías y SPEI mínimo | Tabla 2 | Reducción de la precipitación | Aumento de la temperatura | Efectos combinados |
|--------------------------------|---------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|
| leves | 323 | 357 (35.4%) > | 356 (35.3%) | 326 (32.3%) |

| | | | | |
|-----------|----------------|-------------|-------------|------------------|
| | (32.0%) | | > | > |
| moderadas | 114 (11.3%) | 90 (8.9%) < | 88 (8.7%) < | 110 (10.9%) < |
| severas | 58 (5.7%) | 53 (5.3%) < | 60 (5.9%) > | 45 (4.5%) < |
| extremas | 13 (1.3%) | 21 (2.1%) > | 18 (1.8%) > | 18 (1.8%) > |
| SPEI | -2.334 | -2.401 | -2.547 | -2.453 |

Los resultados mostrados en la Tabla 4 indican, que de manera general, las sequías leves y extremas aumentaran como consecuencia del cambio climático probable; en cambio, las sequías moderadas y severas disminuirán. En estas conclusiones existe una anomalía en las sequías severas del registro con incremento de temperatura, que también aumentan. Respecto a los valores extremos del SPEI, se consideran acordes con las modificaciones impuestas a los registros históricos. Para el tercer escenario, el más crítico, se define en la Tabla 3 como resultados más exactos los de la duración de 18 meses, con los siguientes porcentajes para los cuatro tipos de sequías buscadas: 33.1, 9.9, 5.0 y 2.1.

En la Figura 1b se expone la evolución del SPEI de 12 meses de duración en el registro que incluye ambos efectos del cambio climático, se observa claramente como las sequías aumentarán en duración y severidad hacia el final del registro, disminuyendo notablemente los lapsos húmedos. Por último, en la Figura 1c se muestran las diferencias del SPEI de la Figura 1b menos la 1a.

Conclusiones

Los resultados del SPEI con los registros históricos de la estación climatológica Zacatecas (Tabla 1), ubicada en la capital del mismo nombre, del estado de Zacatecas, México, definen de forma aproximada un 32.2%, 11.5%, 5.0% y 1.3% de sequías leves, moderadas, severas

y extremas, respectivamente. Estos porcentajes y los siguientes, se obtuvieron con base en las duraciones de sequía de 12 a 30 meses.

En los tres escenarios planteados de cambio climático, se encuentra que de manera general las sequías leves y extremas aumentan someramente y que las sequías moderadas y severas disminuyen, también escasamente en número o porcentaje. Se definen de forma global para el tercer escenario (Tabla 3), el más crítico, por conjugar reducción de precipitación y aumento de temperatura media, un 32.7%, 10.5%, 4.8% y 2.0% para cada tipo de sequía.

Las gráficas de evolución del SPEI, como las mostradas en la Figura 1 para una duración de sequías de 12 meses, permiten visualizar y definir de manera precisa los periodos de sequía, así como sus valores puntuales máximos o extremos; lo anterior, tanto en el registro histórico como en los alterados por cambio climático probable.

Al tomar en cuenta, lo consistente de los resultados de este estudio, se recomienda la aplicación sistemática del SPEI en la cuantificación de las sequías históricas y futuras; las primeras basadas en los registros históricos disponibles y las segundas, en sus versiones modificadas, que se deben plantear, de acuerdo a los posibles efectos del cambio climático en cada zona o región del país.

En los escenarios del cambio climático que se consideren factibles de ocurrir, los resultados del SPEI pueden ayudar a poner en perspectiva su impacto en el balance hídrico de una región. Pero, siendo desconocido cómo evolucionarán exactamente las sequías en el futuro, los resultados del SPEI solamente pueden ser considerados orientativos.

Referencias

- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., 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(10), 3001-3023.
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación de la evapotranspiración y análisis de la precipitación. Capítulos 3 y 4. En: Autor (ed.). *Agroclimatología Cuantitativa de Cultivos* (pp. 65-120). México, DF, México: Editorial Trillas.

- Campos-Aranda, D. F. (2015). Contraste de los índices DPP, SPI y RDI para clasificación de sequías, en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 183-193.
- Davis, P. J. (1972). Gamma Function and related functions. Chapter 6 (pp. 253-296). In: Abramowitz, M., & Stegun, I. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions*. New York, USA: Dover Publications.
- Fuchs, B. A., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Hayes, M. J. (2014). Drought indices for drought risk assessment in a changing climate. Chapter 12 (pp. 217-231). In: Eslamian, S. (ed.). *Handbook of Engineering Hydrology. Modeling, Climate Change and Variability*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Haktanir, T. (1991). Statistical modelling of annual maximum flows in Turkish rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 36(4), 367-389.
- Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678.
- 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.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to times scales. *8th. Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184), Anaheim, California, United States of America.
- Mavromatis, T. (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology*, 27(7), 911-924.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Montero, M. J., Martínez, J., Castillo, N. I., & Espinoza, B. E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperatura máxima y mínima. En: Martínez, P. F., & Patiño, C. (eds.). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* (pp. 39-63). Volumen III. Jiutepec, México:

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought* (Research Paper No. 45) (58 pp.). Washington, DC, USA: US Weather Bureau.

Pandey, R. P., Sharma, K. D., Mishra, S. K., Singh, R., & Agarwal, A. (2008). Drought characterization. Chapter 21 (pp. 761-792). In: Singh, V. P. (ed.). *Hydrology and Hydraulics*. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH. (1980). *Boletín Climatológico No. 3. Región Hidrológica No. 37. El Salado*. México, DF, México: Subsecretaría de Planeación, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.

Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In: Maidment, D. R. (ed.). *Handbook of Hydrology* (18.1-18.66). New York, USA: McGraw-Hill, Inc.

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.

Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, 3-11.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.

Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335-2351.

World Meteorological Organization, WMO. (1971). Annexed III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations. In: *Climatic Change* (Technical Note No. 79;

WMO-No. 195). (pp. 58-71). Reprinted. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.

Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1), 65-79.

Zelen, M., & Severo, N. C. (1972). Probability Functions. Chapter 26. In: Abramowitz, M., & Stegun, I. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions* (9th printing) (pp. 925-995). New York, USA: Dover Publications.