

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-11

Notas

Contraste del EDI (Effective Drought Index) mensual como método simple para el monitoreo de sequías meteorológicas

The contrast of the monthly EDI (Effective Drought Index) as a simple method for monitoring meteorological droughts

Daniel Francisco Campos-Aranda¹

¹Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, campos_aranda@hotmail.com

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

Resumen

Los índices de sequías se utilizan para detectar y dar seguimiento a las condiciones de sequía de una zona o región. Diversos índices de sequías han sido propuestos desde mediados de la década de 1970, algunos de ellos fueron desarrollados para una región o clima específicos y, por ello, los estudios de comparación de varios índices de sequía bajo climas

diferentes son siempre útiles y se genera confianza en tales índices cuando sus resultados son semejantes. En este estudio se describe con detalle el procedimiento operativo del EDI (Effective Drought Index), aplicado a datos de precipitación mensual. El EDI fue expuesto originalmente por Byun y Wilhite (1999) para procesar lluvias diarias, pero debido a la dificultad que existe para disponer de tales registros, se desarrolló su versión mensual. Los tres contrastes del EDI descritos en este estudio se realizan para una duración de sequía de 12 meses: 1) con el SPI (Standardized Precipitation Index) de la estación climatológica Río Verde, en San Luis Potosí, México; 2) con el SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) de la estación climatológica Zacatecas, Zacatecas, México, y 3) con el SPDI (Standardized Palmer Drought Index) de la estación climatológica Xilitla, San Luis Potosí, México. Las gráficas de evolución de cada índice contrastado mostraron una gran similitud con las gráficas *únicas* del EDI; pero estas últimas definen un mayor detalle respecto a los cambios de la precipitación mensual. Con base en el análisis de los resultados, se recomienda la aplicación sistemática del EDI mensual en el monitoreo de sequías meteorológicas y en los estudios de comparación de índices debido a que tiene un procedimiento operativo bastante simple, y a que no requiere la definición de la duración de la sequía, lo cual conduce a un único cálculo de tal índice.

Palabras clave: sequías meteorológicas, Índice Efectivo de Sequías (EDI), SPI, SPEI, SPDI, gráficas de evolución de las sequías.

Abstract

Drought indices are used to detect and monitor the drought conditions of an area or region. Various drought indices have been proposed since the mid-sixties, some of them were developed for a specific region or climate and therefore, comparison studies of various drought indices under different climates are always useful and build confidence in such indices, when their results are similar. This study describes in detail the operating procedure of the EDI (Effective Drought Index), applied to monthly precipitation data. The EDI was originally exposed by Byun and Wilhite (1999) to process daily rains, but due to the difficulty of having such records, its monthly version was developed. The three EDI contrasts described in this study are carried out for a drought duration of 12 months: 1) with the SPI (Standardized Precipitation Index) of the climatological station Río Verde, San Luis Potosí, Mexico; 2) with the SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) of the climatological station Zacatecas, Zacatecas, Mexico, and 3) with the SPDI (Standardized Palmer Drought Index) of the climatological station Xilitla, San Luis Potosí, Mexico. The evolution graphs of each contrasted index showed great similarity with the *unique* EDI graphs, but the latter define in more detail the changes of monthly precipitation. Based on the analysis of the results, the systematic application of the monthly EDI, in the monitoring of meteorological droughts and the comparison studies of indexes, is recommended because it has a simple operating procedure, it does not require the definition of the duration of drought, and it is derived from a one-step calculation.

Keywords: Meteorological droughts, Effective Drought Index (EDI), SPI, SPEI, SPDI, drought evolution graphs.

Recibido: 29/07/2019

Aceptado: 27/10/2020

Introducción

La planeación, selección e implementación de las medidas preventivas y reactivas contra los efectos negativos de las sequías se basan en la información sobre su extensión territorial, severidad y duración (Dogan, Berkday, & Singh, 2012; Jain, Pandey, Jain, & Byun, 2015). Tal información se obtiene a través de la detección, seguimiento (Mishra & Singh, 2010; Hao & Singh, 2015) y pronóstico (Mishra & Singh, 2011) de las sequías, lo cual se realiza con base en los llamados *índices de sequía*, que son procedimientos que calculan una variable aleatoria continua en función de una o más variables meteorológicas, como la precipitación, temperatura, humedad del suelo y evapotranspiración potencial (Fuchs, Svoboda, Wilhite, & Hayes, 2014).

La mayoría de los índices de sequías disponibles y comunes fueron desarrollados para regiones específicas y, por ello, tienen limitaciones de uso en condiciones climáticas diferentes debido a la complejidad inherente del fenómeno de las sequías (Fuchs *et al.*,

2014; Jain *et al.*, 2015). Por ejemplo, el PDSI (Palmer Drought Severity Index) fue desarrollado y aplicado en las planicies de EUA (Palmer, 1965); el índice de deciles de Gibbs y Maher (WMO, 1975) se generó y aplicó en Australia; el índice Z de China se usa en tal país (Wu, Hayes, Weiss, & Hu, 2001), y el SPI (Standardized Precipitation Index) expuesto en EUA (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) ha alcanzado universalidad debido al uso eficiente que hace de la información pluviométrica mensual y por la consistencia de sus resultados.

Otro índice que ha demostrado universalidad es el EDI (Effective Drought Index), que originalmente se propuso para procesar información diaria de precipitación (Byun & Wilhite, 1999), pero que debido a las dificultades para tener acceso fácil a registros de tal variable climática lo han transformado y adaptado su procedimiento a registros mensuales y, con ello, se ha contrastado con otros índices de sequías (Smakhtin & Hughes, 2004; Smakhtin & Hughes, 2007; Morid, Smakhtin, & Moghaddasi, 2006; Pandey, Dash, Mishra, & Singh, 2008; Dogan *et al.*, 2012; Jain *et al.*, 2015). Kim, Byun y Choi (2009) han modificado y complementado al EDI original para mejorar su desempeño.

El EDI mensual tiene un cálculo tan simple como los índices Z y Z de China (Campos-Aranda, 2017), al ser un valor estandarizado de su variable principal, que se denomina *precipitación efectiva (EP)*, la cual se obtiene mediante una función de ponderación de la precipitación mensual actual y que precede al mes en análisis. Este cálculo es más simple que el del SPI, basado en sumas móviles de

cierta duración y su manejo probabilístico para convertirlas en variables normales estandarizadas.

Los *objetivos* de este estudio son los dos siguientes: primero, exponer el procedimiento operativo del EDI mensual y, segundo, contrastar sus resultados contra los obtenidos con otros índices mensuales de cálculo más complicado que ya han sido aplicados en varias localidades de México de climas diferentes. Tal es el caso de los tres siguientes: 1) el SPI (McKee *et al.*, 1993; Campos-Aranda, 2017); 2) el SPEI (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010; Beguería, Vicente-Serrano, Reig, & Latorre, 2014; Campos-Aranda, 2018a), y 3) el SPDI (Ma *et al.*, 2014; Campos-Aranda, 2018b).

Procedimiento operativo

El EDI fue propuesto por Byun y Wilhite (1999) para monitorear la duración y severidad de las sequías meteorológicas. Se basa en un concepto nuevo denominado precipitación efectiva (*EP*), que toma en cuenta la lluvia mensual del mes en análisis y la ponderación de las lluvias precedentes, según una función de reducción dependiente del tiempo.

El EDI se calcula con base en la llamada *PRN* o precipitación necesaria para retornar a las condiciones normales. La *PRN* se estima a partir de la desviación de la *EP* respecto a su valor promedio mensual, designada *DEP*. Por último, se estandariza la *PRN* para obtener el EDI. El primer paso para calcular el EDI consiste en estimar la *EP*. Si P_i es la precipitación en los $m-1$ meses antecedentes al mes j en análisis y N es la duración de tal periodo precedente, entonces la *EP* de cada mes será:

$$EP_j = \sum_{m=1}^N \left[\frac{1}{m} (\sum_{i=1}^m P_i) \right] \quad (1)$$

Por ejemplo, si $N = 4$, se tiene: $EP = P_1 + (P_1 + P_2) / 2 + (P_1 + P_2 + P_3) / 3 + (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) / 4$; en donde P_1, P_2, P_3 y P_4 son las lluvias durante el mes en análisis (j), un mes previo, y 2 y 3 meses antes, respectivamente. La media de los valores de *EP* de cada mes se designa \overline{EP}_{nm} , con nm variando de 1 a 12; con tal valor se estiman las desviaciones de la *EP*, según la ecuación:

$$DEP_j = EP_j - \overline{EP}_{nm} \quad (2)$$

Los valores de la *PRN* se calculan con la expresión siguiente:

$$PRN_j = \frac{DEP_j}{\sum_{i=1}^N (1/i)} \quad (3)$$

Cuando $N = 4$, el denominador será igual a la suma de $1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 = 2.08333$. Finalmente, el valor del EDI será igual a:

$$EDI_j = \frac{PRN_j}{\sigma_{PRN}^{nm}} \quad (4)$$

en la cual, σ_{PRN}^{nm} es la desviación estándar de los valores de la PRN en el número de mes (nm) correspondiente al mes en análisis (j).

Respecto a la duración N utilizada en la función de reducción (Ecuación (1)), ha variado desde una duración de tres meses, al parecer empleada por Smakhtin y Hughes (2004, 2007) y por Jain *et al.* (2015), hasta una duración de 48 meses sugerida por Pandey *et al.* (2008). En este estudio se adoptó una duración de 12 meses, también empleada por Dogan *et al.* (2012). Para tal caso, el denominador de la Ecuación (3) es 3.103211. Las ecuaciones (1) a (4) del procedimiento operativo expuesto corresponden a las número 2, 4, 3 y 9 de Byun & Wilhite (1999), respectivamente.

Como ya se indicó, el EDI y el SPI son valores estandarizados, lo que permite comparar la severidad de las sequías meteorológicas en localidades de climas diferentes. Los valores umbral del EDI indican los intervalos de humedad desde el extremadamente seco hasta el extremadamente húmedo. Los intervalos para las sequías son (Smakhtin & Hughes, 2007; Dogan *et al.*, 2012; Jain *et al.*, 2015) las siguientes: cuando el $EDI < -2.00$, se tienen sequías

extremas; cuando varía de $-1.50 > EDI > -2.00$ son severas; cuando fluctúa de $-1.00 > EDI > -1.50$, se definen las sequías moderadas, y cuando varía de $-1.00 < EDI < 1.00$ se tiene una condición normal. En este estudio, cuando el EDI varió de 0 a -1.00 se consideraron sequías leves o ligeras.

Byun y Wilhite (1999) exponen que la Ecuación (1) representa una función de reducción con decaimiento exponencial, dependiente del tamaño N adoptado y, por lo tanto, el procedimiento del EDI tenderá a acrecentar sus valores positivos y a reducir sus magnitudes negativas, según si los valores de los meses iniciales son grandes o pequeños, respectivamente.

Contrastes realizados

Fechas de ocurrencia de las sequías

Los índices SPI, SPEI y SPDI se aplican con diferentes *duraciones* (k) de sequía meteorológica, a través de sumas móviles que generan un número de datos (n_d) en función del número de años (NA) del registro disponible

y de la duración k , según la ecuación (McKee *et al.*, 1993; Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2014; Campos-Aranda, 2017):

$$n_d = 12 \cdot NA - k + 1 \quad (5)$$

En la gráfica de valores del SPI, SPEI o SPDI de cada duración k analizada, se obtienen los números de secuencia o dato (n_d) del inicio y final de la sequía estudiada, y con base en la expresión anterior se despeja NA , cuya porción entera indica el número de años desde el inicio del registro y su parte decimal es el mes respectivo; con esto se obtienen las fechas buscadas.

En la gráfica *única* del EDI se obtiene el número de mes (j) analizado, que corresponde al inicio y final de la sequía estudiada, y con una tabulación completa, como la mostrada en la Tabla 1, se obtiene directamente la fecha respectiva. La primera columna de la Tabla 1 corresponde a los años del registro histórico.

Tabla 1. Evolución del número del mes (j) analizado según los años de registro.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
10	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
20	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
30	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360

40	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
50	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600
60	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720
70	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840
80	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960

La gráfica única del EDI comienza en el mes (j) 13 debido a que la lluvia mensual —de diciembre a febrero— del año inicial del registro se emplea en la Ecuación (1) para definir el primer valor de la precipitación efectiva (EP_1), ya que en este estudio se adoptó un valor de $N = 12$.

EDI en la estación Río Verde, San Luis Potosí

Campos-Aranda (2017) expone la gráfica del SPI con $k = 12$ meses en la estación climatológica Río Verde de clima templado y con un registro de 54 años (1961-2014). Los porcentajes de sequías extremas, severas, moderadas y leves que define el SPI son: 2.2, 2.4, 11.0 y 35.5, cuya suma es del 51.1 %. En cambio, con el EDI se obtienen 0.0, 2.0, 10.5 y 46.2, cuya suma es del 58.7 %. En la Tabla 2 se muestra parte de los

datos y resultados de la aplicación del EDI en la estación climatológica Río Verde del estado de San Luis Potosí, México.

Tabla 2. Datos y resultados parciales del cálculo del EDI en el registro de la estación climatológica Río Verde, San Luis Potosí, México.

Año	Ene	Mar	Abr	May	Jul	Ago	Sep	Nov	Dic
Precipitación mensual (P_i), en milímetros									
1961	19.6	0.0	17.2	0.0	81.8	11.9	63.7	20.4	0.0
1962	0.0	0.0	65.0	0.0	9.5	12.7	23.0	43.8	13.9
1963	0.0	7.8	1.2	40.7	49.5	17.8	59.5	2.6	27.4
2013	0.9	0.5	0.0	15.1	7.8	151.9	242.7	76.9	64.2
2014	12.2	0.0	2.7	50.7	106.3	73.5	201.8	18.4	11.7
Precipitación efectiva (PE), en milímetros									
1962	298.4	174.3	326.1	217.9	279.0	248.2	257.8	329.5	286.6
1963	217.4	155.0	116.6	212.9	522.7	439.5	519.0	394.9	394.2
2014	748.2	461.9	367.5	434.1	717.1	725.2	1145.7	802.5	659.4
Promedios mensuales de la precipitación efectiva, en milímetros									
\overline{EP}_{nm}	435.8	310.4	332.0	350.9	632.0	677.4	818.8	612.9	517.2
Precipitación necesaria para retornar a las condiciones normales (PRN), en mm									
1962	-44.3	-43.9	-1.9	-42.9	-113.7	-138.3	-180.8	-91.3	-74.3
1963	-70.4	-50.1	-69.4	-44.5	-35.2	-76.6	-96.6	-70.2	-39.7
2014	100.7	48.8	11.5	26.8	27.4	15.4	105.3	61.1	45.8
Desviaciones estándar mensuales de la PRN, en milímetros									

σ_{PRN}^{nm}	45.2	35.8	60.1	59.0	108.9	87.3	100.1	62.8	53.2
Valores mensuales del índice efectivo de sequías (EDI), adimensional									
1962	-0.98	-1.23	-0.03	-0.73	-1.04	-1.58	-1.81	-1.45	-1.40
1963	-1.56	-1.40	-1.15	-0.75	-0.32	-0.88	-0.96	-1.12	-0.75
2014	2.23	1.36	0.19	0.45	0.25	0.18	1.05	0.97	0.86

La gráfica del EDI mostrada en la Figura 1 tiene una gran similitud con la citada del SPI. En ella también se observa que una sequía importante por su duración y severidad fue la primera del registro. Tal sequía llegó al mes 61, es decir, a enero de 1966, con su mínimo de -1.96 en octubre de 1962 ($j = 22$).

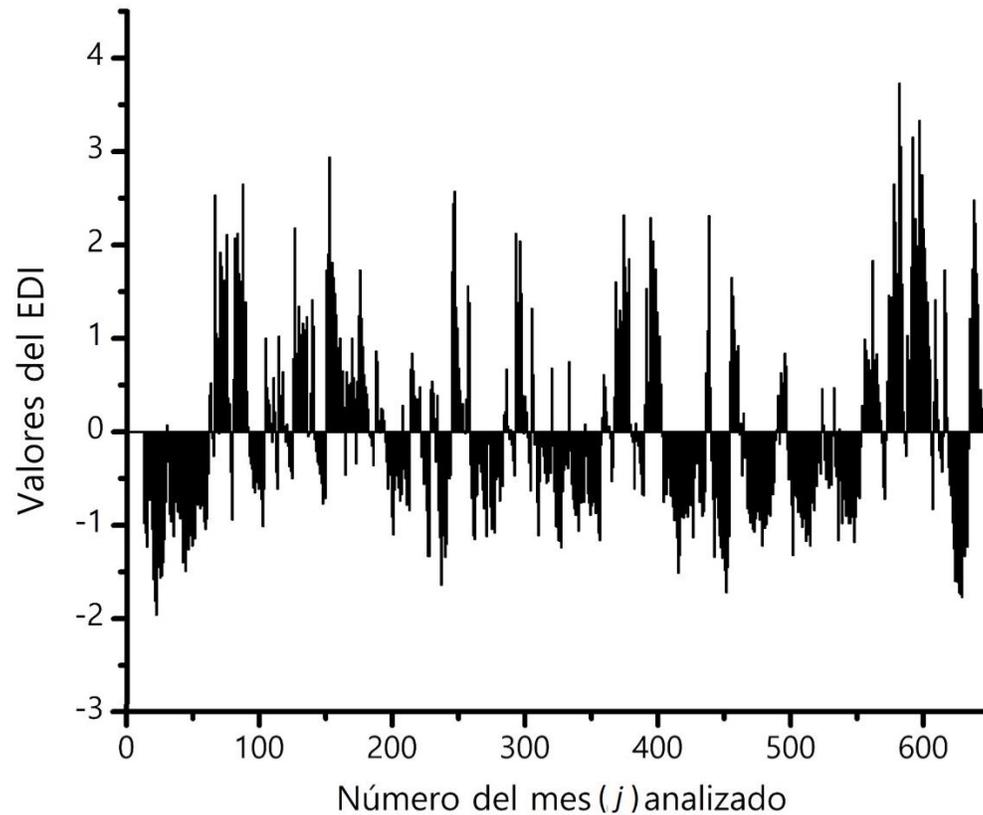


Figura 1. Evolución del EDI mensual en la estación climatológica Río Verde, San Luis Potosí, México.

EDI en la estación Zacatecas, Zacatecas

Campos-Aranda (2018a) muestra la gráfica del SPEI con $k = 12$ meses en la estación climatológica Zacatecas de clima semiárido y con un

registro de 86 años (1930-2015). Los porcentajes de sequías extremas, severas, moderadas y leves que define el SPEI son 1.3, 4.8, 11.8 y 32.8, cuya suma es del 50.8 %. En cambio, con el EDI se obtienen 0.5, 2.0, 11.0 y 43.7, cuya suma es del 57.2 %. En la Tabla 3 se expone una parte de los datos y los resultados de la aplicación del EDI en la estación climatológica Zacatecas del estado de Zacatecas, México.

Tabla 3. Datos y resultados parciales del cálculo del EDI en el registro de la estación climatológica Zacatecas, Zacatecas, México.

Año	Ene	Feb	Abr	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Dic
Precipitación mensual (P_i), en milímetros									
1930	1.0	10.5	19.5	67.0	121.4	53.0	21.8	113.0	14.6
1931	79.3	19.9	2.5	52.4	90.0	81.1	41.2	5.0	11.5
1932	0.0	29.8	0.0	18.0	76.2	98.4	102.2	11.1	0.0
2014	10.8	0.0	0.0	78.8	66.6	107.8	111.4	8.6	22.0
2015	24.1	51.1	25.3	245.5	155.8	66.6	134.2	115.1	18.7
Precipitación efectiva (PE), en milímetros									
1931	889.8	734.6	446.1	514.5	647.2	713.6	642.5	486.0	321.8
1932	245.0	282.2	159.1	145.0	332.6	532.8	696.0	542.2	343.9
1933	354.5	332.4	192.4	275.6	517.3	782.7	1002.1	1062.3	623.9
Promedios mensuales de la precipitación efectiva, en milímetros									
\overline{EP}_{nm}	423.4	356.5	240.1	404.2	589.9	718.2	786.5	690.4	477.4
Precipitación necesaria para retornar a las condiciones normales (PRN), en mm									

1931	150.3	121.8	66.4	35.5	18.5	-1.5	-46.4	-65.9	-50.1
1932	-57.5	-23.9	-26.1	-83.5	-82.9	-59.8	-29.2	-47.8	-43.0
1933	-22.2	-7.7	-15.4	-41.4	-23.4	20.8	69.5	119.8	47.2
Desviaciones estándar mensuales de la PRN, en milímetros									
σ_{PRN}^{nm}	47.8	42.0	33.6	64.3	81.6	70.9	85.2	73.1	49.7
Valores mensuales del índice efectivo de sequías (EDI), adimensional									
1931	3.14	2.90	1.98	0.55	0.23	-0.02	-0.54	-0.90	-1.01
1932	-1.20	-0.57	-0.78	-1.30	-1.02	-0.84	-0.34	-0.65	-0.87
2015	0.23	1.18	3.65	4.04	2.96	2.12	1.99	2.88	2.59

La gráfica del EDI expuesta en la Figura 2 tiene una enorme similitud con la citada del SPEI. En ella también se observa que una sequía importante por su duración y severidad extrema comenzó en el mes 180 (diciembre de 1944) y terminó en el mes 344 (agosto de 1958). Durante tal lapso ocurrió la sequía extrema con un valor del EDI de -2.46 en el mes 332 (agosto de 1957). La última sequía fue importante por su severidad: inició en el mes 969 (octubre de 2010) y concluyó en el mes 1002 (junio de 2013), y tuvo su mínimo extremo del EDI de -2.11 en el mes 980 (agosto de 2011).

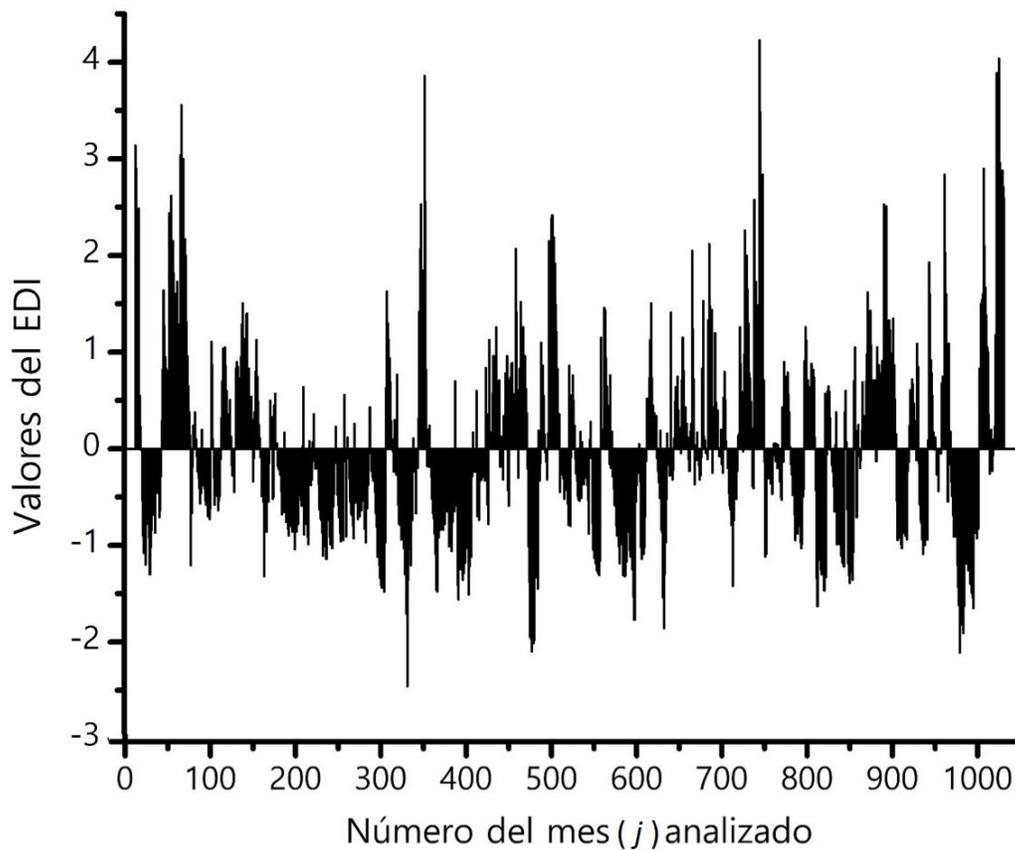


Figura 2. Evolución del EDI mensual en la estación climatológica Zacatecas, Zacatecas, México.

EDI en la estación Xilitla, San Luis Potosí

Campos-Aranda (2018b) presenta la gráfica del SPDI con $k = 12$ meses en la estación climatológica Xilitla de clima cálido-húmedo y con un

registro de 50 años (1965-2014). Los porcentajes de sequías extremas, severas, moderadas y leves que define el SPI son 0.2, 6.6, 13.9 y 31.6, cuya suma es del 52.3 %. En cambio, con el EDI se obtienen 0.2, 4.1, 12.9 y 36.9, cuya suma es del 54.1 %. En la Tabla 4 se muestra parte de los datos y resultados de la aplicación del EDI en la estación climatológica Xilitla del estado de San Luis Potosí, México.

Tabla 4. Datos y resultados parciales del cálculo del EDI en el registro de la estación climatológica Xilitla, San Luis Potosí, México.

Año	Feb	Mar	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Precipitación mensual (P_i), en milímetros									
1965	28.5	42.8	32.2	445.7	462.3	681.3	578.5	300.8	117.5
1966	95.6	106.3	226.6	726.4	192.1	193.0	183.7	534.4	76.0
1967	93.7	88.9	165.2	246.3	200.2	995.9	468.2	417.3	89.9
2013	20.7	22.8	311.5	218.5	603.5	602.3	1067.8	310.2	450.5
2014	90.9	86.7	233.6	659.8	323.0	296.1	530.3	487.1	55.5
Precipitación efectiva (PE), en milímetros									
1966	2393.7	2150.8	2234.4	3827.5	3254.6	2972.6	2786.5	3768.4	3012.0
1967	1896.8	1694.6	1436.2	1762.1	1872.7	4439.8	4559.0	4637.7	3767.0
2014	3126.4	2685.9	2549.2	3860.9	3676.8	3551.5	4228.2	4614.6	3593.5
Promedios mensuales de la precipitación efectiva, en milímetros									
EP_{nm}	2035.3	1777.4	1761.3	2391.8	3004.5	3447.6	4252.2	4025.0	3357.2

Precipitación necesaria para retornar a las condiciones normales (PRN), en mm									
1966	115.5	120.3	152.5	462.7	80.6	-153.0	-472.3	-82.7	-111.3
1967	-44.6	-26.7	-104.8	-202.9	-364.7	319.7	98.9	197.4	132.1
2014	351.6	292.7	253.9	473.4	216.6	33.5	-7.7	190.0	76.2
Desviaciones estándar mensuales de la PRN, en milímetros									
σ_{PRN}^{mm}	146.0	139.1	170.4	272.0	339.2	291.3	391.5	314.4	263.9
Valores mensuales del índice efectivo de sequías (EDI), adimensional									
1966	0.79	0.87	0.89	1.70	0.24	-0.53	-1.21	-0.26	-0.42
1967	-0.31	-0.19	-0.61	-0.75	-1.08	1.10	0.25	0.63	0.50
2014	2.41	2.10	1.49	1.74	0.64	0.12	-0.02	0.60	0.29

La gráfica del EDI mostrada en la Figura 3 tiene una gran similitud con la citada del SPDI. En ella destacan dos sequías: 1) la antepenúltima, que contiene el valor mínimo extremo del EDI, comienza en el mes 499 (junio de 2006) y termina en el mes 509 (mayo de 2007), con el mínimo de -2.12 en el mes 503 (octubre de 2006), y (2) la última sequía es de las de mayor duración y severidad, inicia en el mes 550 (octubre de 2010) y termina en el mes 582 (junio de 2013).

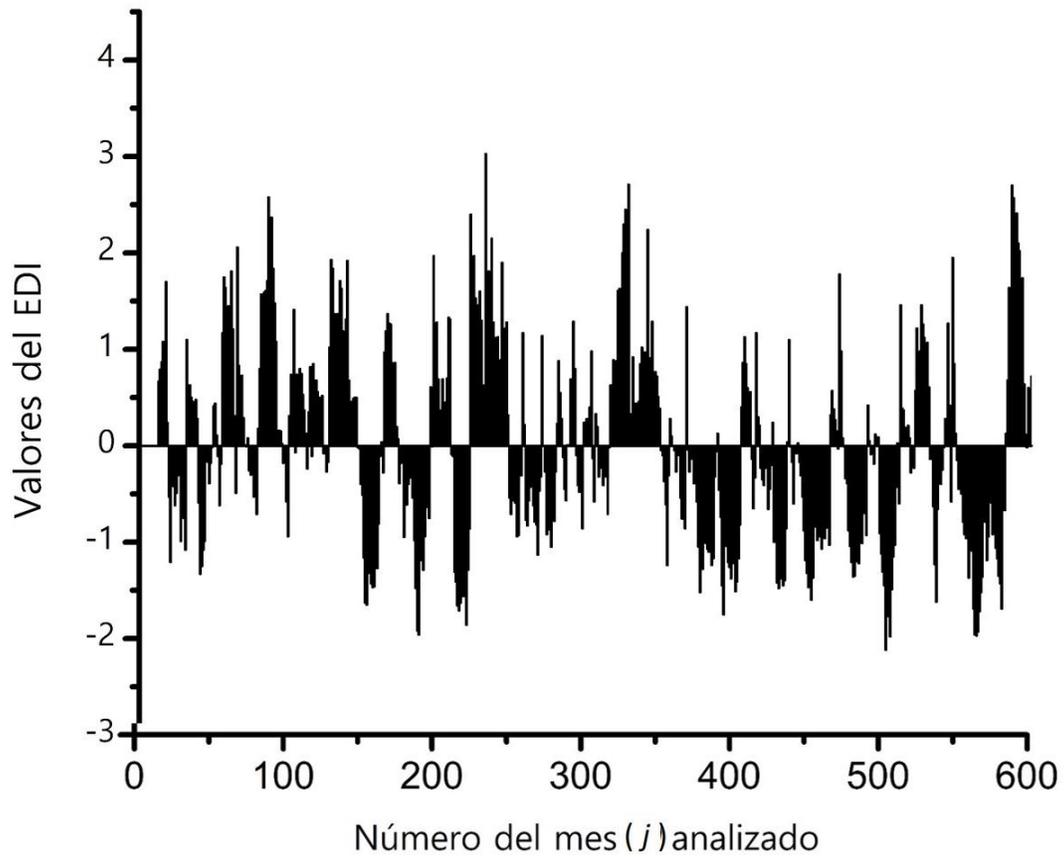


Figura 3. Evolución del EDI mensual en la estación climatológica Xilitla, San Luis Potosí, México.

Discusión de resultados

Los tres contrastes realizados en climas diferentes y para una duración de sequías meteorológicas de 12 meses aportan resultados alentadores, que sugieren la aplicación sistemática del EDI debido a su sencillez de cálculo y a la ventaja interpretativa de sólo conducir a una gráfica de evolución.

Sin embargo, conviene destacar la necesidad de realizar más contrastes tanto en otros climas como para diferentes duraciones de sequía; por ejemplo, las otras ocho comúnmente estudiadas al aplicar el SPI en 3, 6, 9, 18, 24, 36, 48 y 72 meses (Cheval, 2015).

Conclusiones

Los tres índices de sequías meteorológicas: SPI, SPEI y SPDI, contrastados con el EDI mensual, procesan sumas móviles de duración k de tres variables aleatorias sumamente diferentes y, sin embargo, los porcentajes de sequías extremas, severas, moderadas y ligeras que definen sólo muestran resultados escasamente diferentes con los establecidos con el EDI de un proceso operativo mucho más simple de la precipitación mensual.

Además, las gráficas de evolución de cada índice contrastado: SPI, SPEI y SPDI, en los casos analizados, para una duración de k

= 12 meses, mostraron una gran similitud con las gráficas *únicas* del EDI mensual, las cuales definen un mayor detalle en relación con los cambios que presenta la precipitación mensual de estaciones climatológicas de climas diferentes.

Por lo anterior, se recomienda la aplicación sistemática del EDI mensual en el monitoreo de sequías meteorológicas, y en los estudios de comparación de índices debido a que no requiere la definición de la duración k de la sequía y es más sensitivo a los cambios de la precipitación mensual en relación con los valores acumulados de lluvia u otra variable en los k meses de duración.

Agradecimientos

A la doctora Jéssica Rosaura Campos Delgado de la UDLAP se agradece el haber elaborado todas las gráficas de evolución de las sequías citadas y mostradas en este estudio.

A los tres árbitros anónimos (A, B y C) se agradecen sus observaciones y comentarios, los cuales permitieron aclarar los alcances del estudio y ayudaron a esclarecer sus limitaciones.

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.

- Byun, H.-R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.
- Campos-Aranda, D. F. (2018a). Cuantificación con el SPEI de sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 210-233. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-02-09
- Campos-Aranda, D. F. (2018b). Contrastes del Índice de Sequías de Palmer Estandarizado (SPDI) en tres ubicaciones climáticas de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 246-279. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-05-10
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Cuantificación de sequías meteorológicas mensuales: cotejo de cuatro índices en tres localidades de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(3), 159-172.
- Cheval, S. (2015). The Standardized Precipitation Index - An overview. *Romanian Journal of Meteorology*, 12(1-2), 17-64.
- Dogan, S., Berktaş, A., & Singh, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268.
- 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.

- Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678.
- Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K., & Byun, H.-R. (2015). Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes*, 8(10), 1-11.
- Kim, D-W., Byun, H-R., & Choi, K-S. (2009). Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 378(1-2), 1-12.
- 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.
- 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, USA.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling-A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971-985.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Research Paper No. 45). Washington, DC, USA: U.S. Weather Bureau.

- Pandey, R. P., Dash, B. B., Mishra, S. K., & Singh, R. (2008). Study of indices for drought characterization in KBK districts in Orissa (India). *Hydrological Processes*, 22(12), 1895-1907.
- Smakhtin, V. U., & Hughes, D. A. (2007). Automated estimation and analysis of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 880-890.
- Smakhtin, V. U., & Hughes, D. A. (2004). *Review, automated estimation, and analysis of drought indices in South Asia* (Working Paper 83). Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- 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.
- Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the Statistical Z-score. *International Journal of Climatology*, 21(6), 745-758.
- WMO, World Meteorological Organization. (1975). Methods of Analysis (pp. 27-52). In: *Drought and Agriculture* (Technical Note No. 138). Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.