

Comparación de cuatro índices para la caracterización de sequías meteorológicas en la localidad de Guanare, Estado Portuguesa, Venezuela

Roman Montaña Ramirez¹, Ines Castillo Santa María², Bessy Castillo Santa María³, Juan Quispe Rodríguez⁴, Bertha Larico Quispe⁵, Erick Delgado Bazan⁶, Zadith Garrido Campaña⁷, César Osorio Carrera³, Martín Grados Vasquez³, Luis Ramirez Calderón³

¹Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Chile, Santiago, Chile.

²Universidad Nacional de San Martín, Perú.

³Escuela de Postgrado, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Perú.

⁴Universidad Nacional Autónoma de Huanta, Huanta, Perú.

⁵Universidad Nacional de Cañete, San Luis de Cañete, Perú.

⁶Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Privada del Norte, Sede Lima Centro, Perú.

⁷Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Continental, Huancayo, Perú.

Autor para correspondencia: Roman Montaña Ramirez, romanjmr2020@gmail.com

(Recibido: 10-06-2021. Publicado: 16-07-2021.)

Resumen

El objetivo de este estudio radicó en comparar los resultados de cuatro índices para la caracterización de sequías meteorológicas en la localidad de Guanare, Estado Portuguesa. La información utilizada para el estudio se obtuvo del registro de datos meteorológicos, provenientes de series de precipitación mensual de la estación meteorológica Aeropuerto-Guanare del estado Portuguesa, para el período 1982-2015. Se utilizaron los índices de Precipitación Estandarizado (ISP), índice estadístico Z (IEZ), índice Z Chino (IZC) y porcentaje de precipitación normal (PPN), basados en datos de precipitación mensual, lo cual permitió identificar y describir los eventos de sequía en la localidad en estudio. Los resultados obtenidos con los índices IEZ, IZC y PPN reflejaron valores heterogéneos en los porcentajes de ocurrencia de sequías, sobre todo en el reconocimiento de sequías severas y extremas; en comparación con el ISP. Con base en lo anterior, el ISP demostró poseer mayor sensibilidad a los cambios de precipitación, resultando ser la mejor opción para la detección de los eventos de sequía por ser más consistente y confiable.

Palabras clave: *índice de sequía, sequía meteorológica, índice estandarizado de precipitación, índice estadístico Z, índice Z China, porcentaje de precipitación normal.*

Abstract

The objective of this study was to compare the results of four indices for the characterization of meteorological droughts in the town of Guanare, Portuguese State. The information used for the study was obtained

from the record of meteorological data, from monthly precipitation series of the Airport-Guanare weather station in the state of Portuguesa, for the period 1982-2015. Standardized Precipitation Index (SPI), Z Statistical Index (ZSI), Chinese Z Index (CZI) and Percentage of Normal Precipitation (PNP) were used, based on monthly precipitation data, which allowed to identify and describe drought events in the locality under study. The results obtained with the ZSI, CZI and PNP indices reflected heterogeneous values in the percentages of occurrence of droughts, especially in the recognition of severe and extreme droughts; compared to the ISP. Based on the above, the SPI demonstrated greater sensitivity to precipitation changes, proving to be the best option for the detection of drought events for being more consistent and reliable.

Keywords: *drought index, meteorological drought, standardized precipitation index, Z statistical index, Z index China, percentage of normal precipitation.*

1. Introducción

Las sequías meteorológicas se han convertido en eventos temporales y recurrentes, y que quizás sea considerado el riesgo natural más complejo debido a su evolución lenta, lo cual dificulta su detección oportuna. Es por ello, que en las últimas décadas se ha hecho énfasis en la cuantificación exacta y oportuna de las sequías meteorológicas para minimizar sus daños, a través de los llamados índices de sequía (Ntale y Gan, 2003). Estos índices por lo general utilizan los datos de precipitación mensual o anual, por ser los de registro disponible más amplio y también los de mayor cobertura espacial, en comparación con otras variables climáticas y/o hidrológicas (Pandey et al., 2008). Dependiendo de la manera en que se procesan los datos de precipitación, los índices de sequías permiten su detección, o bien estiman su severidad, frecuencia y cobertura espacial (Tsakiris et al., 2005). En efecto, estos índices han resultado ser útiles en la detección de sequías, seguimiento y estimación indirecta de sus impactos, lo cual ha permitido elaborar planes de prevención y contingencia contra tales eventos, a pesar de no ser capaces de cuantificar los daños económicos (Mishra y Singh, 2010; Lobato, 2016). Para un mejor análisis, las sequías se han agrupado en diversas categorías, como meteorológicas, hidrológicas, agrícolas, de abastecimiento hídrico y subterráneas, las cuales hacen referencia tanto al momento en que se observa un déficit en la precipitación como en el lapso para la percepción de los efectos de éste por los diferentes sectores (Pereira et al., 2009).

De ahí que, en las últimas décadas se han desarrollado numerosos índices para la identificación y seguimiento de eventos de sequía, basados en la calidad y cantidad de datos climáticos disponibles, y en la habilidad de estos en detectar consistentemente las variaciones espaciales y temporales durante un evento de sequía (Morid et al., 2006). En este sentido, se han aplicado varios índices para identificar períodos de sequía en diversas regiones de Sudamérica; tal es el caso de Alessandro (2008), quién utilizó el porcentaje de precipitación normal (PPN) con el fin de evaluar los patrones de circulación asociados a la sequía en Argentina. Serio et al. (2010), utilizaron el índice de precipitación estandarizado (ISP) a fin de evaluar la predicción estadística de eventos secos y húmedos en la región pampeana. No obstante, determinar un índice apropiado en cierta región y bajo ciertas condiciones climáticas, es visto con gran interés, de ahí que, diversos autores han hecho uso de estos índices para estudiar el comportamiento de las sequías, comparándolos también con otros, dado que ningún índice es universalmente adecuado y superior en todas las circunstancias, tal como lo describen Mishra y Singh (2010). Es así, que autores como Ntale y Gan (2003) definieron ocho criterios para la comparación de índices de sequía, siendo similares a los propuestos por Keyantash y Dracup (2002). Krepper y Zucarelli (2012) realizaron comparaciones para la Cuenca del Plata, considerando los índices ISP, Z-Score y Z de China. Dogan et al. (2012), compararon seis índices de monitoreo de sequías, y diferentes lapsos en meses de aplicación, en zonas semi-áridas. Es por ello, que el objetivo de este estudio

radicó en comparar los resultados de cuatro índices; índice de Precipitación Estandarizado (ISP), índice estadístico Z (IEZ), índice Z Chino (IZC) y porcentaje de precipitación normal (PPN), basados en datos de precipitación mensual, para la caracterización de sequías meteorológicas en la localidad de Guanare, Estado Portuguesa.

2. Metodología

2.1 Zona de estudio

La localidad del municipio Guanare se localiza al noroeste del estado Portuguesa, entre los $08^{\circ} 52' 36''$ y $09^{\circ} 26' 44''$ de latitud norte y los $69^{\circ} 25' 50''$ de longitud oeste. Limita por el norte con el Municipio José Vicente de Unda y el Estado Lara; por el sur con los Municipios San Genaro de Boconoito y Papelón; por el este con el Municipio Ospino y por el Oeste con los Municipios San Genaro de Boconoito y Sucre. El clima es tropical de sabana, con una temperatura media de 28°C que se atenúa en las zonas altas y una precipitación media anual de 1.400 a 1.800mm. La información utilizada para el estudio se obtuvo del registro de datos meteorológicos, provenientes de series de precipitación mensual de la estación meteorológica Aeropuerto-Guanare del estado Portuguesa para el período 1982-2015. Con respecto a los cálculos para cada uno de los índices aplicados (ISP, IEZ, IZC y PPN), se emplearon secuencias de sequías para 1 y 3 meses.

2.2 Índices de sequías

2.2.1 Determinación del índice de precipitación estandarizado (ISP)

Se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), desarrollado por McKee, et al. (1993), para una escala mensual del periodo 1982-2015; con la finalidad de caracterizar las sequías meteorológicas en la localidad bajo estudio. Su aplicación requiere del uso de series históricas de precipitación mensual y ofrece la ventaja de manipular diversas escalas de tiempo, haciendo posible identificar los impactos de la sequía en periodos de corto, mediano y largo plazo; además permite identificar y describir convenientemente el fenómeno, precisando su intensidad, magnitud y duración.

Para cada mes se determinó el valor acumulado mensual, obteniéndose así 12 sub-series. Se estimaron los parámetros α y β de la Distribución de Probabilidad Teórica Gamma (DPTG) asociada a cada una de esas 12 sub-series de precipitación acumulada. La función de densidad de probabilidad de la DPTG está dada por la ecuación 1:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

Donde $f(x, \alpha, \beta)$: es la función de densidad de probabilidad Gamma, (x): es la lluvia acumulada mensual expresada en mm; (α y β) son los parámetros de escala y de forma de la distribución, respectivamente y Γ : Distribución Gamma. Por otra parte, la probabilidad de que el acumulado mensual, en una subserie, sea menor o igual al registro existente, se representa como $F(x)$ y se estima según la ecuación 2:

$$F(x) = \int_0^x f(x, \alpha, \beta) dx \quad (2)$$

Para estimar los parámetros α y β de la ecuación 1, se utilizó la metodología propuesta por Campos (2005), que se resume a continuación: en primer lugar, se calcula para cada subserie mensual, una variable auxiliar adimensional (A), definida en la ecuación 3:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_1^n \ln x_i}{n} \quad (3)$$

Donde $\ln(x_i)$ es el logaritmo neperiano del registro acumulado, n' representa el número de registros no nulos, y es la media aritmética de la subserie mensual expresada en mm. Del paso anterior se obtienen 12 variables auxiliares, A. Posteriormente, la estimación de los parámetros α y β de cada subserie se realiza aplicando las ecuaciones 4 y 5.

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}A}}{4A} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad (5)$$

Los registros nulos en las subseries mensuales imposibilitan calcular la variable auxiliar A (el logaritmo neperiano de cero tiende a infinito), por lo tanto, se empleó la Función Gamma Mixta (FGM) propuesta por Thom (1971) y Wu et al. (2005) como sigue en la ecuación 6:

$$H(X) = q + pF(X) \quad (6)$$

Donde (q) es la probabilidad de que se presente un valor nulo en la sub-serie, ($p = 1 - q$) es la probabilidad de que no se presente un valor nulo en la sub-serie, y $H(X)$ es la probabilidad de no excedencia del registro. Una vez obtenidas las 12 series de probabilidades Gamma, se estimó el valor Z o valor de SPI que le corresponde, en una distribución normal estandarizada con media cero y desviación estándar igual a 1.

2.2.2 Determinación del índice estadístico Z (IEZ)

Este índice permite la comparación entre observaciones procedentes de poblaciones normales diferentes; su designación proviene de la variable normal estandarizada (Z), definida por Wu et al. (2001) como:

$$IEZ_{k,j} = \frac{X_{k,j} - \bar{x}_k}{\bar{S}_k} \quad (7)$$

en la cual $X_{k,j}$ es la precipitación de la secuencia j y de un periodo k, que es de 1 y 3 meses. La media y desviación estándar de la ecuación (7) son:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n_d} \sum_{j=1}^{n_d} X_{k,j} \quad (8)$$

$$S_k = \left[\frac{1}{n_d} \sum_{j=1}^{n_d} (X_{k,j} - \bar{x}_k)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

2.2.3 Determinación del índice Z China (IZC)

Este índice asume que la precipitación mensual procede de una distribución Pearson tipo III y por ello emplea la aproximación Wilson-Hilferty para relacionar al IEZ con este índice (Wu et al., 2001; Morid et al., 2006; Dogan et al., 2012), según la siguiente expresión:

$$IZC_{k,j} = \frac{6}{C_{s_k}} \left(\frac{C_{s_k}}{2} IEZ_{k,j} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_{s_k}} + \frac{C_{s_k}}{6} \quad (10)$$

siendo C_{s_k} el coeficiente de asimetría, cuya ecuación es:

$$C_{s_k} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} (X_{k,j} - \bar{x}_k)^3}{n_d \cdot S_k^3} \quad (11)$$

2.2.4 Determinación del porcentaje de precipitación normal (PPN)

Es uno de los índices de sequía más utilizado dado a la simplicidad de los cálculos y su interpretación intuitiva, según World Meteorological Organization y Global Water Partnership (2016). El porcentaje de la precipitación normal (PPN) es una de las medidas más directas del desvío de la precipitación respecto a su promedio de largo plazo, descritos por Morid et al (2006). Igualmente, Hayes (2000) refiere que los estudios que utilizan el PPN son efectivos cuando se aplican en una región particular o una única estación astronómica, dado que el índice puede malinterpretarse cuando se generaliza a regiones amplias. La determinación de este índice involucra dos pasos; primero, se obtiene el valor medio (X_{med}) para el mes o los meses considerados, luego, el valor de precipitación (X_i) se divide por la media y se multiplica por 100 a fin de obtener el PPN, tal como se muestra en la ecuación:

$$PPN = \frac{X_i}{X_{med}} \cdot 100 \quad (12)$$

Se considera que un valor de precipitación es normal (100%) cuando coincide con el valor medio para una dada ubicación. El PPN puede calcularse para una variedad de escalas temporales, desde un único mes a un conjunto de meses que representen estaciones astronómicas o años hidrológicos.

2.3 Criterios de comparación

La comparación de los 4 índices de sequía se realizó en escalas de 1 y 3 meses, las cuales han sido utilizadas por otros autores como Wu et al. (2001) y Dogan et al. (2012). En este sentido, los tres índices de sequías IEZ, IZC y SPI poseen el mismo rango de valores numéricos, por lo tanto, permiten la comparación entre ellos, en relación con la severidad de las sequías, sin importar las diferencias climáticas entre ellas. Los valores umbral de los índices positivos definen lapsos húmedos y sus valores negativos los episodios de sequía de acuerdo con lo que se muestra en la Tabla 1. Por el contrario, el índice de porcentaje de precipitación normal difiere totalmente en los valores rangos de categorización, obtenidos por Morid et al. (2006), los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Categorización de los periodos húmedos y secos con base en el valor del índice IEZ, IZC y SPI.

Valor del índice	Designación	Probabilidad de ocurrencia (%)
>2.00	Húmedo extremo	2.28
1.50 a 1.999	Húmedo severo	4.40
1.00 a 1.499	Húmedo moderado	9.19
0 a 0.999	Húmedo ligero	34.13
0 a -0.999	Sequía leve (SL)	34.13
-1.00 a -1.499	Sequía moderada (SM)	9.19
-1.50 a -1.999	Sequía severa (SS)	4.40
-2.00 o menor	Sequía extrema (SE)	2.28

Fuente: Smakhtin y Hughes, 2007; Dogan et al., 2012.

Tabla 2: Categorización de los periodos secos y húmedos con base al valor del índice de porcentaje de precipitación normal (PPN).

Categoría	PPN
Sequía extrema	$0\% \leq \text{PPN} < 25\%$
Sequía severa	$25\% \leq \text{PPN} < 50\%$
Sequía moderada	$50\% \leq \text{PPN} < 75\%$
Sequía leve	$75\% \leq \text{PPN} < 100\%$
Ligeramente húmedo	$100\% \leq \text{PPN} < 125\%$
Moderadamente húmedo	$125\% \leq \text{PPN} < 150\%$
Severamente húmedo	$150\% \leq \text{PPN} < 175\%$
Extremadamente húmedo	$\text{PPN} \leq 175\%$

Fuente: Morid et al. (2006).

3. Resultados

3.1 Índice de precipitación estandarizado (ISP)

En la Tabla 3 se muestran los porcentajes de ocurrencia de sequías obtenidos a través del ISP, para un período de sequía mensualizado, donde se evidencian eventos de sequía extrema en 1,96%, predominando una sequía leve del 36,03% y un evento húmedo ligero de 36,03%; considerando estos valores bajo un comportamiento normal o aproximadamente normal según la escala propuesta por McKee et al. (1993). De manera que, se evidenció que en el año 1977 hubo mayor ocurrencia de eventos de sequías extremas, destacándose los meses de abril, junio

y diciembre. Con relación al período de sequía para 3 meses, se observó un incremento en la ocurrencia de sequías extremas de 1,04 %, reflejado en más cantidad de años en comparación al período mensualizado.

Tabla 3: Porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías obtenidos con el índice de precipitación estandarizado (ISP) para 1 y 3 meses de sequías, en la localidad de Guanare, estado Portuguesa.

Designación	Duración de secuencias analizadas (meses)	
	1 % de ocurrencia	3 % de ocurrencia
Húmedo extremo	2,94	3,0
Húmedo severo	3,43	3,2
Húmedo moderado	7,84	9,9
Húmedo ligero	36,03	36,2
Sequía leve (SL)	36,03	31,5
Sequía moderada (SM)	9,07	9,4
Sequía severa (SS)	2,70	3,9
Sequía extrema (SE)	1,96	3,0

3.2 Índice estadístico Z (IEZ)

En la Tabla 4 se evidencia que los valores obtenidos con el IEZ para ambas secuencias de sequías no arrojan eventos de sequía extrema y severa. Con relación a los eventos de sequías moderadas, tuvo una ocurrencia del 21,6 % para la duración mensual, con mayor cantidad de meses en el año 2000, seguido de los años 1985, 1986, 1989, 2004 y 2013; mientras que para la secuencia de 3 meses el resultado fue de 23,2 %, siendo los años 1996 y 2000 con mayor número de meses con eventos de sequía moderada, seguida de los años 1986, 1998 y 2008.

Tabla 4: Porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías obtenidos con el índice estadístico Z (IEZ) para 1 y 3 meses de sequías, en la localidad de Guanare, Estado Portuguesa.

Designación	Duración de secuencias analizadas (meses)	
	1 % de ocurrencia	3 % de ocurrencia
Húmedo extremo	3,4	2,7
Húmedo severo	4,9	5,2
Húmedo moderado	9,8	11,1
Húmedo ligero	28,9	29,6
Sequía leve (SL)	31,4	28,3
Sequía moderada (SM)	21,6	23,2
Sequía severa (SS)	0,0	0,0
Sequía extrema (SE)	0,0	0,0

3.3 Índice Z China (IZC)

En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos con el IZC, dónde se visualiza la ausencia de eventos sequías severas y extremas en lo que respecta a la duración mensual. En cuanto a los sucesos de sequías leves y moderadas, se obtuvo una ocurrencia del 27,7 % y 22,3 % respectiva-

mente, siendo el año 2000 con mayor cantidad de meses con ocurrencia de sequías moderadas seguido de los años 1985, 1986, 1989, 1990, 2004 y 2013. No obstante, los datos obtenidos para una secuencia de 3 meses no mostraron sequías extremas; sin embargo, reflejó un 2,7 % de sequía severa.

Tabla 5: Porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías obtenidos con el índice Z China (IZC) para 1 y 3 meses de sequías, en la localidad de Guanare, estado Portuguesa.

Designación	Duración de secuencias analizadas (meses)	
	1 % de ocurrencia	3 % de ocurrencia
Húmedo extremo	2,5	1,7
Húmedo severo	4,7	5,7
Húmedo moderado	11,3	11,8
Húmedo ligero	31,6	32,5
Sequía leve (SL)	27,7	25,1
Sequía moderada (SM)	22,3	20,4
Sequía severa (SS)	0,0	2,7
Sequía extrema (SE)	0,0	0,0

3.4 Determinación del porcentaje de precipitación normal (PPN)

En la Tabla 6 se reflejan los porcentajes de ocurrencia de sequías, obtenidos a través del PPN; donde se observan eventos de sequías extremas de 28,19 %, viéndose este comportamiento para los años 1995, 1996, 1997 y 2000, cuando se analiza a una secuencia de 1 mes. En relación con las sequías medidas a 3 meses, se observó que la ocurrencia de sequías extremas fue de 18,5 %, para los años 1996 y 2000 principalmente, seguido del año 2008.

Tabla 6: Porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías obtenidos con el índice de precipitación normal (PPN) para 1 y 3 meses de sequías, en la localidad de Guanare, Estado Portuguesa.

Designación	Duración de secuencias analizadas (meses)	
	1 % de ocurrencia	3 % de ocurrencia
Húmedo extremo	20,59	15,5
Húmedo severo	6,13	10,3
Húmedo moderado	7,84	9,6
Húmedo ligero	12,50	13,1
Sequía leve (SL)	8,82	11,3
Sequía moderada (SM)	6,62	10,6
Sequía severa (SS)	9,31	11,1
Sequía extrema (SE)	28,19	18,5

3.5 Relación entre los índices de sequía y comparación de las categorizaciones

En la Tabla 7 se muestran los porcentajes de ocurrencia de sequía obtenidos para cada uno de los índices. En cuanto a los resultados de los índices ISP y IEZ, se observa un comportamiento heterogéneo en las ocurrencias de sequías para las escalas de 1 y 3 meses. Esto podría estar

asociado al hecho que las series de precipitación no se ajusten a una distribución normal, lo cual estaría afectando los valores del IEZ, tal como lo reportaron Ortiz et al. (2018) y Penalba et al. (2014). Asimismo, se evidencia una similitud en los resultados de los índices IEZ y IZC, que tienden a subestimar los porcentajes de sequías severas y extremas y, sobrestiman los eventos de sequía moderada con respecto a los demás; coincidiendo este comportamiento con lo reportado por Campos (2017). Por otro lado, al comparar los datos generados por los índices IZC y ISP, se observan valores cercanos en los porcentajes de ocurrencia de sequías leves; sin embargo, se aprecian diferencias marcadas en la ocurrencia de sequías severas y extremas, tal como lo plantea Morid (2006). No obstante, el PPN resultó ser el menos sensible, dado que sobreestimó notoriamente las condiciones de sequía severa y extrema, lo cual podría estar asociado a los umbrales propuestos para la categorización de sequías, situación señalada por Dogan et al. (2012). Estos resultados revelan una gran diferencia en los valores obtenidos con el ISP, siendo este comportamiento evidenciado por Morid et al. (2006) y Dogan et al. (2012).

Tabla 7: Porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías obtenidos con los cuatro índices aplicados (ISP, IEZ, IZC y PPN) para secuencias de 1 y 3 meses, en la localidad de Guanare, estado Portuguesa.

Tipo de sequía	Índices y duración de secuencias analizadas (meses)							
	ISP		IEZ		IZC		PPN	
	1	3	1	3	1	3	1	3
SL (%)	36,03	31,5	31,4	28,3	27,7	25,1	8,82	11,3
SM (%)	9,07	9,4	21,6	23,2	22,3	20,4	6,62	10,6
SS (%)	2,70	3,9	0,0	0,0	0,0	2,7	9,31	11,1
SE (%)	1,96	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,19	18,5

5. Conclusiones

La comparación de los resultados obtenidos con los índices ISP, IEZ, IZC y PPN, basados en datos de precipitación mensual como variable de entrada; con la finalidad de categorizar la sequía en la localidad de Guanare, estado Portuguesa permitió evidenciar que, los índices IEZ, IZC y PPN reflejaron valores heterogéneos en los porcentajes de ocurrencia de sequías, sobre todo en el reconocimiento de sequías severas y extremas; en comparación con el ISP. Con base en lo anterior, el ISP demostró poseer mayor sensibilidad a los cambios de precipitación, resultando ser la mejor opción para la detección de los eventos de sequía por ser más consistente y confiable; razón por la cual se ha convertido en uno de los índices con mayor aplicabilidad a nivel mundial.

Referencias bibliográficas

Alessandro P (2008): Anomalías de circulación atmosférica en 500 y 1000 hPa asociada a la sequía producida en la Argentina durante enero de 2003 a marzo de 2004. *Revista Brasileira de Meteorología*, 23:12-29.

Campos 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

Dogan S, Berktaç A, Singh 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.

Hayes J (2000): Drought indices. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, Estados Unidos. <http://drought.unl.edu>.

Keyantash J, Dracup J (2002): The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 83:1167-1180.

Krepper M, Zucarelli V (2012): Climatology of Water Excess and Shortages in the La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 102:13-27.

Lobato R (2016): El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5):197-211.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184), Anaheim, California, American Meteorological Society, Boston.

Mishra K, Singh 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.

Ntale K, Gan Y (2003): Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology*, 23(11):1335-1357.

Ortiz R, Cárdena J, Ortiz F, Alvarado P (2018): Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico. 9(3):47-91. DOI:10.24850/j-tyca-2018-03-03

Pandey P, Dash B, Mishra K, Singh R (2008): Study of indices for drought characterization in KBK districts in Orissa (India). *Hydrological Processes*, 22(12):1895-1907.

Penalba O, Rivera J (2014): Trends and Spatial Patterns of Drought Affected Area in Southern South America. *Journal Climate* . 2:264-278; doi:10.3390/cli2040264

Pereira S, Cordery I, Iacovides I (2009): *Coping with water scarcity: Addressing the challenges*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Serio L, Martin P, Murphy G (2010): Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia*, 27:11-17.

Smakhtin U, Hughes A (2007): Automated estimation and analysis of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22(6):880-890.

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

World Meteorological Organization y Global Water Partnership (2016): Handbook of Drought Indicators and Indices. In M. Svoboda, & B.A. Fuchs (Eds.), *Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Geneva: Integrated Drought Management Programme (IDMP).

Wu H, Hayes 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.