

Comportamiento de índices de sequía meteorológica a través de las dimensiones espaciales y temporales

Behavior of meteorological drought indices across spatial and temporal dimensions

Tania Gudelia Núñez-Magaña¹ ,
Silvia del Carmen Ruíz-Acosta² ,
Miguel Ángel Palomeque de la Cruz¹ ,
Adalberto Galindo-Alcántara^{1*} 

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya. CP. 86150. Villahermosa, Tabasco, México.

²Tecnológico Nacional de México/IT Zona Olmeca, Ignacio Zaragoza s/n, Lomas de Ocuilzapotlán Uno. CP. 86270. Ocuilzapotlán, Tabasco, México.

*Autor de correspondencia: adalberto.galindo@ujat.mx

Artículo científico

Recibido: 25 de febrero 2022

Aceptado: 30 de mayo 2022

Como citar: Núñez-Magaña TG, Ruíz-Acosta SC, Palomeque de la Cruz MA, Galindo-Alcántara A (2022) Comportamiento de índices de sequía meteorológica a través de las dimensiones espaciales y temporales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): e3298. DOI: 10.19136/era.a9n2.3298

RESUMEN. El fenómeno de sequía meteorológica ha sido objeto de estudio por los desastres ambientales que ocasiona, la estimación de índices de sequía meteorológica (ID_S) permite cuantificar los daños y ayuda a generar planes de mitigación. El objetivo de este estudio fue determinar la intensidad o extensividad de los ID_S de mayor aplicación para mejorar su evaluación. Se realizó una revisión sistemática de los trabajos publicados en los últimos 40 años, que incluyó un análisis del comportamiento de las dimensiones espaciales, escalas temporales y clima del sistema con los resultados arrojados por los ID_S. El análisis reveló que los ID_S son extensivos. Esto ocasiona que las evaluaciones de los ID_S tengan influencia espacial, puntos de observación, longitud de las series de datos, clima y la escala temporal. Además, se señala la viabilidad de los ID_S para su aplicación y alcanzar una mayor exactitud en las evaluaciones.

Palabras clave: Clima, densidad, escala temporal, homogeneidad espacial.

ABSTRACT. The phenomenon of meteorological drought has been the object of study due to the environmental disasters it causes, and the estimate of meteorological drought indices (ID_S) allows to quantify the damages, thus helping to generate mitigation plans. The objective was to determine the intensity or extensity of the greater application ID_S to improve its evaluation. A systematic revision of published works from the last 40 years was carried out, which included an analysis of the behavior of the spatial dimensions, temporals, climate of the system with the results produced by the ID_S. The analysis revealed that are intensive. This causes ID_S assessments to have spatial influence, observation points, data length, weather, and temporal scale. In addition, the feasibility of the ID_S is pointed out for its application, reaching a higher accuracy in the evaluations.

Key words: Weather, density, spatial homogeneity, temporal scale.

INTRODUCCIÓN

Las sequías provocan el desplazamiento de los organismos debido a los desastres ecológicos, biológicos y socioeconómicos que ocasionan. La sequía meteorológica es un fenómeno originado por la escasez de precipitaciones en periodos prolongados de tiempo (Trenberth *et al.* 2014, Campos-Aranda 2018). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) reconoce el término como las condiciones meteorológicas anormalmente secas que provocan un periodo prolongado sin precipitaciones y ocasionan un grave desequilibrio hidrológico (OMM 2016). Por esta razón, las sequías meteorológicas son consideradas como factor preponderante que desencadena el resto de los tipos de sequía (Wu *et al.* 2015, She y Xia 2017). La ocurrencia de este fenómeno depende de las características de las precipitaciones tales como magnitud, intensidad y frecuencia entre estaciones húmedas, las cuales determinan la severidad del déficit y anomalías de precipitaciones acumuladas (Bong y Richard 2019).

La sequía meteorológica representa un peligro para la vida de todos los organismos del planeta porque impacta de forma negativa la prevalencia, el desarrollo y funcionamiento de los ecosistemas (Huang *et al.* 2018, Cortez-Villa *et al.* 2020). Los daños se extienden a la sociedad, el medio ambiente y economía, con una limitada capacidad para enfrentar oportunamente este fenómeno, el cual consigue la categoría de desastre ambiental (Liu *et al.* 2016, Sardiñas *et al.* 2019). Por lo que el riesgo natural es de los más complejos de analizar, de evolución lenta y ha sido objeto de estudio en muchas regiones del mundo (Penalba y Rivera 2015, Peña-Gallardo *et al.* 2016, Campos-Aranda 2017, Olivares y Zingaretti 2018).

La formación de huracanes, anomalías de temperatura superficial en los océanos, el comportamiento del sistema atmosfera-océano y tiempo atmosférico-clima solar están regidos por las singularidades de las sequías meteorológicas (Campos-Aranda 2017). La medida de estas permite cuantificar los daños causados por la sequía, genera información para su predicción, manejo de los recursos

hídricos, planeación (Cortez-Villa *et al.* 2020, Malik y Kumar 2020), determinación de zonas vulnerables, distribución espacial (Rafiei-Sardooi *et al.* 2018, Soh *et al.* 2018), elementos para la gestión de riesgos, preparación y atenuación de sequía (OMM 2016).

La estimación de estas singularidades se basan en la evaluación de índices de sequía meteorológica (I_{DS}) (Jain *et al.* 2015, Yacoub y Tayfur 2016, Yang *et al.* 2017, Malik y Kumar 2020). A pesar de que los I_{DS} son cantidades adimensionales (Keyantash y Dracup 2002), estos se originan de la relación entre una o más variables dimensionales. La extensividad es la propiedad de una variable que refleja la dependencia al área de estudio o sistema, caso contrario a la propiedad intensiva (Munson *et al.* 2006, Potter *et al.* 2012). Esta permite establecer la viabilidad de los I_{DS} para su aplicación en función de las dimensiones del sistema (tamaño), puntos de observación, clima, escala temporal y otorga mayor exactitud en las evaluaciones de las singularidades de las sequías meteorológicas.

Antes de la aplicación de los I_{DS} no se suele analizar su intensividad o extensividad, más la falta de registros históricos en las áreas de estudio dirige a las evaluaciones de los I_{DS} hacia la interpolación de los datos meteorológicos existentes (Staud *et al.* 2007, Goerlich 2012). Además, se ha dado poca importancia a la cobertura espacial, es decir, a la densidad de puntos por unidad de área requerido para medir las variables meteorológicas involucradas en los cálculos de los I_{DS} , por lo que se desconoce si los registros con los que se cuenta son escasos, excesivos o suficientes en función de las dimensiones del área de estudio para la estimación de sequías. Ante esta situación, este estudio tuvo como objetivo determinar si los I_{DS} más utilizados son intensivos o extensivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión sistemática con metaanálisis (Aston *et al.* 2021, Daryanto y Song 2021, Dordević *et al.* 2021) de los trabajos publicados de 29 países de los últimos 40 años en las bases de

datos, Web of Science, Scopus, ScienceDirect, JS-TOR, PubMed y Google Académico. Solo se tomaron en cuenta artículos relacionados con la estimación de I_{DS} con información de las características cuantitativas (frecuencia, ocurrencia, intensidad, magnitud, severidad) y cualitativas (conjunto de cualidades y atributos: variabilidad climática, eventos repentinos) de una sequía meteorológica. También se tomaron en cuenta estudios sobre la evidencia de variaciones de sequía con respecto a la resolución espacial y artículos relacionados con correlación espacial. Se excluyeron artículos con definiciones de sequía, estrés por sequía en plantas o animales u organismos vivos, estudios de tolerancia a la sequía, sequía fisiológica, sequía socioeconómica, mecanismos de resistencia a la sequía, modelación de sequía, proyecciones de sequía en función al cambio climático, evaluación de almacenamiento de aguas subterráneas para determinar sequías. Para analizar la información se elaboró una base de datos con los siguientes parámetros, el ID aplicado, área de estudio o sistema, número de puntos de observación, longitud de las series de datos (Wang *et al.* 2021), tipo de clima, escala temporal, respuesta: al clima y escala temporal, viabilidad para sistemas con pocos registros meteorológicos, herramientas aplicadas para la homogenización espacial (Wu *et al.* 2015, Yang *et al.* 2017) y de datos (Bong y Richard 2019).

En los casos donde la información se encontraba de manera parcial, como la extensión territorial, tipo de clima del área en estudio, valores de precipitación y temperatura media anual, se recurrió a la búsqueda en organismos y servicios meteorológicos oficiales de cada país para complementarla. Mientras que, donde solo se contaba con las coordenadas geográficas del área de estudio, se calculó el área utilizando Google Earth a partir del cual se trazó el polígono y se extrajo el área de estudio (Equipo Urbano 2007). Posteriormente, se determinó la intensidad o extensividad de los I_{DS} , a través de la sensibilidad del sistema y la dependencia climática.

La sensibilidad del sistema se analizó por medio de la influencia de las dimensiones del sistema en los resultados de las evaluaciones de los I_{DS}

considerando la densidad de puntos de observación (ρ_e , con unidades km^2/est) y su relación con la homogeneidad espacial. La ρ_e se definió como el sistema (a) entre el número de puntos de observación (e) con registros históricos de las variables meteorológicas, obtenida a través de $\rho_e = a/e$. Para el análisis se suma la comparación de los resultados donde se ha demostrado que los I_{DS} de mayor aplicación son sensibles en áreas de estudio, específicamente en áreas menores a $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ y superiores a los $3 \times 10^6 \text{ km}^2$. También, la homogeneidad espacial se analizó a través de las características de los registros históricos observados, como la longitud de las series de datos y la homogeneidad de datos. El segundo punto principal abordado para el análisis fue el clima, para determinar cómo las escalas temporales reflejan la intensidad o extensividad de los I_{DS} .

RESULTADOS

La revisión sistemática, produjo una base de datos de 114 artículos (Tabla 1), que tuvo los siguientes resultados, el índice de precipitación estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) presentó una frecuencia de 49%, el índice de evapotranspiración estandarizada (SPEI, por sus siglas en inglés) un 15%, el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) un 9%, el índice de reconocimiento de sequía (RDI, por sus siglas en inglés) un 6% e índice China-Z (CZI, por sus siglas en inglés) 5% de 27 I_{DS} encontrados con mayor frecuencia (Figura 1).

Sensibilidad del sistema

El 92.18% de los estudios analizados reportan el número de estaciones y el área de estudio o sistema. El cálculo de las densidades (ρ_e) mostró 51 resultados diferentes (Tabla 2). La $\rho_e = 32.24 \text{ km}^2/\text{est}$ fue la más pequeña seguida de $\rho_e = 71.30 \text{ km}^2/\text{est}$ para evaluar el SPI. En contraposición, $\rho_e = 3\ 734\ 889.16 \text{ km}^2/\text{est}$ fue la densidad mayor. Con esta ρ_e se analizaron 11 regiones en diferentes tipos de climas en el mundo, cada región con 12 puntos de observación. La primera columna de la Tabla 2 representa el número de identificación (ID), seguida

de la procedencia de los datos, el número de estaciones cuya magnitud es adimensional (1), el área de estudio o sistema en km^2 , ρ_e en km^2/est y la longitud de las series de datos (l) en años. Mientras que el 7.82% de los estudios no revelaron el número de estaciones. La homogeneidad espacial representa la distribución equitativa entre el número de estaciones y la superficie espacial. El 21.15% de los estudios trabajaron con homogeneidad espacial, el 57.70% reportan haber trabajado sin homogeneidad espacial. Solo el 21.15% aplicó algún método de interpolación espacial como, el método Kriging con un 45.46%, el método de ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) con 27.27%, el método Spline, la media espacial y el método del polígono de Thiessen cada uno con 9.09% para alcanzar la homogeneidad espacial. Por otro lado, el 5.78% de los I_{DS} de mayor aplicación reveló tener sensibilidad al sistema. Especialmente el SPI y SPEI dependen del sistema para caracterizar la intensidad y duración de periodos húmedos o secos. El SPI tiene mayor probabilidad de identificar la sequía como más grave en sistemas menores a $1 \times 10^6 \text{ km}^2$, mientras que el SPEI lo hace para áreas del orden de $3 \times 10^6 \text{ km}^2$. Aplicar una $\rho_e = 1 \text{ 200 km}^2/\text{est}$ es viable para evaluar al SPI en sistemas menores a $1 \times 10^6 \text{ km}^2$. Mientras que, el índice de porcentaje de anomalía de precipitación (PAP, por sus siglas en inglés) determina secas repentinas graves a extremas históricas en sistemas superiores a $3 \times 10^6 \text{ km}^2$. En áreas pequeñas es oportuno examinar directamente las observaciones de las estaciones meteorológicas, en lugar de datos procedentes de grids. En cuanto al resto de los I_{DS} de mayor aplicación (Figura 1) ninguno de los autores reportó evidencias de la sensibilidad de los I_{DS} al área de estudio.

En la longitud de las series de datos se observó que los autores registraron periodos de uno a 200 años. Los estudios con la longitud de las series de datos de largo, mediano y corto plazo fueron de 51 a 200 años con un 54.19%, 31 a 50 años con 29.51% y de uno a 30 años con 16.30% respectivamente (Tabla 2). El 25% trabajó con datos continuos previamente procesados, mientras que el 75% restante presentaron datos faltantes o datos escasos. De este

grupo, el 32.69% aplicó algún de interpolación para completar la serie, el 15.39% trabajó con datos sin continuidad y un 26.92% no completaron las series de tiempo optando por utilizar el método Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial (PET). Este método se caracteriza por requerir pocos datos para estimar el PET utilizado para la evaluación del SPEI y RDI. Por su parte, los resultados de la homogeneidad espacial mostraron que todos los estudios aseguran está característica. Mientras que, los métodos de tendencias estadísticas o no paramétricos fueron las herramientas utilizadas para eliminar valores atípicos, eliminar ruidos o comportamientos no deseados en las series de tiempo. Se encontraron 23 métodos diferentes, sin ninguna tendencia hacia algún método.

Tabla 1. Frecuencia de los estudios publicados con evaluaciones de I_{DS} por país y la característica dominante.

No.	País	Estudios Publicados	Característica prevalente en I_{DS}
1	Argentina	6	Intensivo
2	Austria	1	Extensivo
3	Brasil	3	Extensivo
4	China	20	Intensivo
5	Corea del Sur	1	Intensivo
6	Cuba	1	Intensivo
7	España	4	Intensivo
8	Estados Unidos	15	Intensivo
9	Finlandia	1	Extensivo
10	Grecia	1	Extensivo
11	Hungría	2	Intensivo
12	India	10	Intensivo
13	Indonesia	3	Intensivo
14	Irán	6	Intensivo
15	Japón	1	Intensivo
16	Malasia	1	Intensivo
17	Mauritania	4	Intensivo
18	México	9	Intensivo
19	Pakistán	6	Intensivo
20	Paraguay	6	Extensivo
21	Perú	1	Extensivo
22	Polonia	1	Intensivo
23	Republica Checa	1	Intensivo
24	Sri Lanka	1	Intensivo
25	Sudáfrica	1	Intensivo
26	Sudan	1	Intensivo
27	Turquía	4	Intensivo
28	Venezuela	1	Intensivo
29	Zambia	2	Intensivo

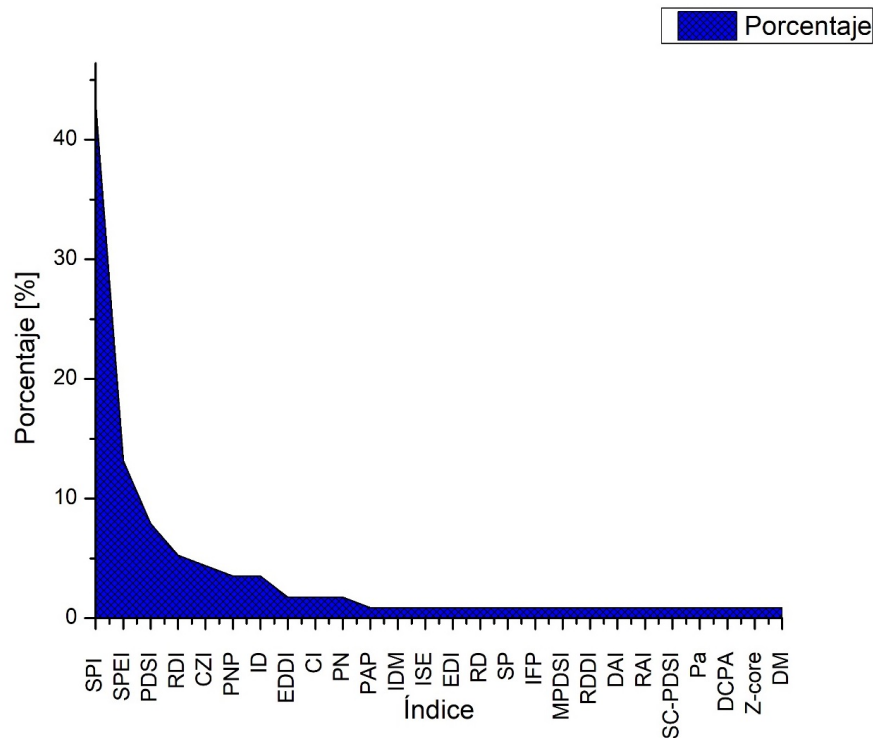


Figura 1. Frecuencia porcentual de los índices aplicados para la detección de sequías meteorológicas.

Condiciones climáticas y la escala temporal

Las condiciones climáticas del sistema mostraron vínculos con el establecimiento de puntos de observación sinópticos en un 8.33%. Mientras que el resto (91.37%) no consideró esta característica. El 64.29% de los estudios analizados asume la robustez del ID, únicamente el 35.71% reconoce que los I_D s dependen del clima del sistema. De estos, el 40% corresponde a evaluaciones hechas por el SPEI, el 23.33% al SPI, el 20.00% al PDSI, el 13.33% al RDI y 3.34% al CZI. Mientras que, la escala temporal aplicada en los I_D s osciló entre un mes y 72 meses. Algunos trabajaron en periodos de un mes dirigidos a la determinación de humedad del suelo. El SPI de tres meses otorgó una estimación estacional de la precipitación, los de seis y nueve meses indicaron tendencias a mediano plazo de patrones de precipitación. Otros con escalas a largo plazos (nueve a 12 meses) revelaron una estimación anual de los niveles en los embalses y caudales de los ríos.

DISCUSIÓN

El SPI, SPEI, PDSI, RDI y CZI fueron los índices de mayor aplicación en la detección de sequía meteorológica (Figura 1). Lo cual se debe a su frecuente aplicación en todo el mundo y que la mayoría de estos índices son sugeridos por la OMM u organismos administrativos de cada país (Tabla 1).

Sensibilidad del sistema

Los puntos de observación desarrollaron dos funciones en la evaluación los I_D s. La primera, la evaluación del ID elegido en cada punto de observación (Campos-Aranda 2018, Yao *et al.* 2018, Zhang *et al.* 2019). En la segunda, los puntos de observación se utilizaron para interpolar puntos o generar grids en el sistema, para alcanzar la homogeneidad espacial (Peña-Gallardo *et al.* 2016, Yang *et al.* 2017, Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez 2020). Los estudios que no reportaron el número de puntos de observación refleja que tienen metodologías

Tabla 2. Atributos preliminares de los estudios analizados.

ID	Autor	e est.	a km ²	ρ_e km ² /est	l años
1	Harisuseno (2020)	6	193.41	32.24	20
2	Peña-Gallardo <i>et al.</i> (2016)	1 224	87 268	71.30	111
3	Penalba y Rivera (2015)	48	4 779	99.56	47
4	Campos-Aranda (2017)	3	322	107.33	50
5	McKee <i>et al.</i> (1993)	1	151.4	151.40	30-100
6	Bong and Richard (2019)	15	2 456	163.73	30
7	Kim <i>et al.</i> (2009)	1 840	605.2	0.33	200
8	Seiler <i>et al.</i> (2002)	3	576	192.00	25
9	Soh <i>et al.</i> (2018)	6	2 400	400.00	32
10	Liu <i>et al.</i> (2016)	101	75 000	742.57	53
11	Mishra and Singh (2009)	5	4 265	853.00	50
12	Abeysingha and Rajapaskha (2020)	54	65 610	1 215.00	48
13	Wu <i>et al.</i> (2015)	24	34 097	1 420.71	43
14	Hayes <i>et al.</i> (1999)	6 000	9 800 000	1 633.33	100
15	Hayes <i>et al.</i> (2000)	100	200 520	2 005.20	130
16	Cortez-Villa <i>et al.</i> (2020)	61	123 367	2 022.41	29
17	Tan <i>et al.</i> (2015)	22	66 000	3 000.00	40
18	Dabanli <i>et al.</i> (2017)	250	783 562	3 134.25	80
19	Mohanta <i>et al.</i> (2020)	1	3850	3 850.00	35
20	Mahajan and Dodamani (2016)	59	258 948	4 388.95	52
21	Jain <i>et al.</i> (2015)	13	58 058	4 466.00	102
22	Campos-Aranda (2018)	16	77 685	4 855.31	65
23	Livada and Assimakopoulos (2007)	23	131 957	5 737.26	51
24	Yang <i>et al.</i> (2017)	21	134 800	6 419.05	46
25	Rouault and Richard (2003)	465	3 103 759	6 674.75	79
26	SÖnmez <i>et al.</i> (2005)	101	783 562	7 758.04	51
27	Edwards (1997)	1 221	9 800 000	8 026.21	84
28	Andrade-Velazquez <i>et al.</i> (2020)	10	82 478	8 247.80	57
29	Heim (2002)	1 119	9 800 000	8 757.82	1 y 100
30	Paulo <i>et al.</i> (2016)	9	92 212	10 245.78	99
31	AL-Timimi y AL-Jiboori (2013)	39	435 052	11 155.18	30
32	Adnan <i>et al.</i> (2018)	58	796 096	13 725.79	64
33	Zhang <i>et al.</i> (2019)	14	210 000	15 000.00	20
34	Yu <i>et al.</i> (2014)	609	9 500 000	15 599.34	60
35	Ayantobo <i>et al.</i> (2017)	552	9 500 000	17 210.14	52
36	Yao <i>et al.</i> (2018)	552	9 500 000	17 210.14	52
37	Zhang <i>et al.</i> (2016)	520	9 500 000	18 269.23	53
38	Potop y Možný (2011)	4	78 871	19 717.75	50
39	Tirivarombo <i>et al.</i> (2018)	6	156 995	26 165.83	56
40	Yu <i>et al.</i> (2013)	16	494 000	30 875.00	55
41	Asadi Zarch <i>et al.</i> (2011)	40	1 648 000	41 200.00	30
42	Li <i>et al.</i> (2019)	35	1 800 000	51 428.57	59
43	Tabari <i>et al.</i> (2012)	10	713 122	71 312.20	40
44	Olivares <i>et al.</i> (2016)	3	229 111	76 370.33	29, 33 y 34
45	Zarei and Mahmoudi (2017)	17	1 648 194	96 952.59	54
46	Kubicz (2018)	3	312 679	104 226.33	33
47	Komusco <i>et al.</i> (1999)	7	783 562	111 937.43	58
48	Wang <i>et al.</i> (2021)	64	9 500 000	148 437.50	57
49	Elagib and Elhag (2011)	14	2 505 813	178 986.64	68
50	Yacoub and Tayfur (2016)	3	1 030 000	34 3333.33	44
51	Asadi Zarch <i>et al.</i> (2015)	4 000	359 685 360	89 921.34	50
52	Vicente-Serrano <i>et al.</i> (2010)	132	359 685 360	2724 889.09	98

que consideran poco relevante este parámetro. Pero, la disponibilidad y cantidad de datos apropiados son fundamentales para detectar variaciones espaciales y temporales durante un evento de sequía (Van-

gelis *et al.* 2011). Por lo que la naturaleza de los datos de variables meteorológicas *in situ* en la evaluación de los I_{DS} es básico. Las ρ_e revelaron que a mayor número de puntos de observación se

tiene menor ρ_e lo que representa mayor cobertura espacial. Mientras que, lo opuesto genera una ρ_e mayor y menor cobertura espacial en el sistema. Sobre esto, Harisuseno (2020) con la ρ_e más pequeña, reporta que se tienen resultados confiables y adecuados aplicando el SPI. Respecto a la ρ_e más pequeña las estaciones se emplearon para la elaboración de mallas (Peña-Gallardo *et al.* 2016). Por lo que los resultados obtenidos fueron óptimos en el análisis de series de precipitación y temperatura media. A pesar de que la ρ_e puede minimizar incertidumbres debido a la homogeneidad espacial en el sistema las aproximaciones generadas con las interpolaciones de los datos generan incertidumbres en los resultados (Goerlich 2012). En la ρ_e más grande reportada por Vicente-Serrano *et al.* (2010) las evaluaciones del SPI y SPEI tuvieron pocas diferencias en todas las escalas temporales y respondieron a la precipitación, pero no a la variabilidad climática interanual. Pero, los pocos detalles de la metodología de observación generan incertidumbre sobre estas afirmaciones y se desconoce ante qué condiciones los índices ocultan el comportamiento de la sequía en escalas temporales interanuales. Un estudio que destacó por la ρ_e que presentó fue de Elagib y Elhag (2011) realizado en Sudán para la evaluación del SPI, el cual reporta una ρ_e exponencialmente superior lo sugerido por la OMM que fue aumentando en el tiempo de análisis. Pero el efecto fue minimizado al calcular la media espacial partiendo de anomalías estandarizadas a largo plazo (Nicholson 1986, 1993, Elagib y Elhag 2011). Pero se reporta que, una evaluación es oportuna con datos procedentes de estaciones meteorológicas y no de aproximaciones (Goerlich 2012). A pesar que en África oriental, el SPI se considera como el ID idóneo para monitorear sequías con un requerimiento de datos modestos y de fácil interpretación (Ntale y Gan 2003). Estas afirmaciones están basadas en los resultados de Elagib y Elhag (2011) donde, la ρ_e genera una limitada cobertura espacial de observación, menor nivel de agregación espacial (Goerlich 2012) y los puntos de observación suponen representar los climas contrastantes del sistema. Por tanto, las afirmaciones de Elagib y Elhag (2011) están basadas en evaluaciones poco confiables.

La homogeneidad espacial y la altitud fue omitida en la mayoría de los estudios analizados. Al respecto, Rouault y Richard (2003), Livada y Assimakopoulos (2007) e Yao *et al.* (2018) reportan que esta última variable es necesaria para calcular los puntos de observación, argumentando que a mayor altitud menor número de observaciones. Lo que, asegura puntos de observación con condiciones atmosféricas para la precipitación (variable principal de la que dependen los I_{DS}) y capturar la influencia de los océanos, orografía y geografía del sistema. Pero, recientemente se han registrado precipitaciones por varias horas en sitios donde no existen condiciones atmosféricas para la precipitación (NSIDC 2021). Lo que demuestra que la precipitación no necesariamente se encuentra ligada a la altitud del sistema, ni a las condiciones atmosféricas. Los hechos reflejan que no se tiene la certeza de las condiciones atmosféricas específicas que pueden desarrollar la precipitación. Además, de que la altitud, asegura la homogeneidad de precipitación como criterio de observación, puede no ser viable para generar datos de entrada en la evaluación de los I_{DS} .

La interpolación se aplica para aproximar datos faltantes en estudios sin continuidad en la longitud de las series de datos y para alcanzar la homogeneidad espacial. Recientemente se ha demostrado que los I_{DS} son sensibles al área de estudio y que requieren de una ρ_e específica para minimizar errores en los cálculos (Li *et al.* 2020). En específico, el SPEI es menos sensible al medir la severidad de una sequía en áreas grandes. Al respecto, Goerlich (2012) mencionan que la aplicación de datos aproximados no es viable para la estimación de periodos húmedos o secos en áreas pequeñas. Lo que se puede deber a que en áreas pequeñas se puede tener una mayor cobertura espacial y consecuentemente, más información del comportamiento del fenómeno de sequía. Por lo que, los I_{DS} dependen del ρ_e y no es posible asumir que el resto de los I_{DS} estén exentos de esta característica. Además, de que existen estudios con graves errores en observaciones que afectan regiones con baja ρ_e , a pesar del procesamiento y control de calidad (Dinku *et al.* 2007, Belo-Pereira *et al.* 2011, Liebmann *et al.* 2012, Dutra *et al.* 2013).

Lo que indica que, la precisión en la vigilancia de la sequía depende principalmente la cobertura espacial y la frecuencia temporal de las observaciones *in situ*.

Condiciones climáticas y la escala temporal

Los I_{DS} dependen desde la formulación de variables climáticas a excepción del SPI que es el de mayor aplicación y CZI. Aunque no este incluida en su formulación ambos mostraron sensibilidad ante las variables climáticas. Lo que, muestra que los I_{DS} dependen de las condiciones climáticas. Globalmente, la mayoría de los estudios no considera las características climáticas del sistema. Ya que, asumen su robustez (Campos-Aranda 2018, Cortez-Villa *et al.* 2020). Solo la tercera parte reconoce que el SPEI, SPI, PDSI, RDI y CZI fue sensible al clima del sistema (Vicente-Serrano *et al.* 2010, Elagib y Elhag 2011, Liu *et al.* 2016, Wang *et al.* 2021).

La escala temporal de los I_{DS} depende del periodo de evolución de la sequía que se desee observar. El SPI en escalas de corto plazo mostró inconsistencias en la identificación de sequía (Hayes *et al.* 2000) y magnificó la severidad en periodos menores a dos meses. Al respecto, Mishra *et al.* (2009) revelaron que la frecuencia de las sequias decaen exponencialmente con la escala temporal del SPI mientras que la duración aumenta (Figura 2). Lo que confirma que una limitación del SPI es su proceso de estandarización, la sequía medida por el SPI puede ocurrir con la misma frecuencia en todos los lugares cuando se considera un período prolongado (Komuscu 1999). En adición el PDSI y SPEI no son precisos en las escalas temporales a corto plazo (Vicente-Serrano *et al.* 2010, Potop y Možný 2011, Choi *et al.* 2013, Liu *et al.* 2016, Soh *et al.* 2018, Li *et al.* 2020). Lo que indica que los I_{DS} son sensibles a la escala temporal de evaluación. Sobre lo mismo Wang *et al.* (2021) reportan que las regiones climáticas con la escala temporal de 20, 30 y 90 días son idóneas en la detección de sequías con el SPI. Pero, se desconoce la validez de esta afirmación en sistemas con diferentes características climáticas. Además, en sistemas donde se tienen pocas precipitaciones se recomienda tener cautela para evaluar el SPI a escalas temporales de corto plazo (OMM 2012). So-

bre esto Bong y Richard (2019) no pudieron medir la sequía en diferentes escalas temporales con el SPI sin homogeneidad espacial. Mientras que, Rouault y Richard (2003) y Peña-Gallardo *et al.* (2016) con homogeneidad espacial lo lograron. Lo que confirma que la homogeneidad espacial evita sesgos, ofrece mayor calidad en los datos y permite medir la variabilidad climática (Easterling *et al.* 1996). Por lo que, la homogeneidad espacial es un factor básico para realizar evaluaciones precisas a través de los I_{DS} (Dabanlt *et al.* 2017) y revela que el SPI es extensivo.

La homogeneidad de datos debe eliminar los factores que pueden ocultar el verdadero comportamiento climático del sistema generado por cambios en la instrumentación, variaciones en el tiempo de observación y microambiente (Wu *et al.* 2007, Soh *et al.* 2018). Lo anterior, obedece a que la homogeneidad de datos supone que los registros siguen alguna distribución estadística (Guttman 1991, Hobbins *et al.* 2016, Ayantobo *et al.* 2017). Pero, una distribución de probabilidad inadecuada puede inferir sesgo en los resultados del ID y perder precisión (Stagge *et al.* 2015, Guerreiro *et al.* 2017, Zhang and Li 2020, Zhao *et al.* 2020). Lo que significa que, la homogeneidad de datos no asegura la robustez del I_{DS} , ni la calidad de los datos. Debido a que, los I_{DS} están influenciados por el comportamiento climático y que definir puntos sinópticos no integran las características climáticas del sistema. Mientras que, el PDSI mostró sensibilidad a cambios de escala temporal, localización de estaciones y al procesamiento de la homogeneidad de datos (Liu *et al.* 2016). Al respecto, Palmer (1965), Guttman (1991) y Heim (2002) sugieren que las extrapolaciones fuera de climas semiáridos y secos-subhúmedos en evaluaciones del PDSI conducen a resultados poco precisos. Lo que indica que el PDSI es sensible a la cobertura espacial por lo que es un ID extensivo. Los I_{DS} que utilizan exclusivamente datos de precipitaciones son la mejor opción para identificar sequias meteorológicas (Olukayode 1985, Vicente-Serrano *et al.* 2010) como es el caso del SPI. Pero, Asadi *et al.* (2011) reportan limitaciones en datos de precipitaciones, precisión en mediciones y el número de estaciones de medición. Por lo que, la longitud de las series de datos no tuvo la capacidad de iden-

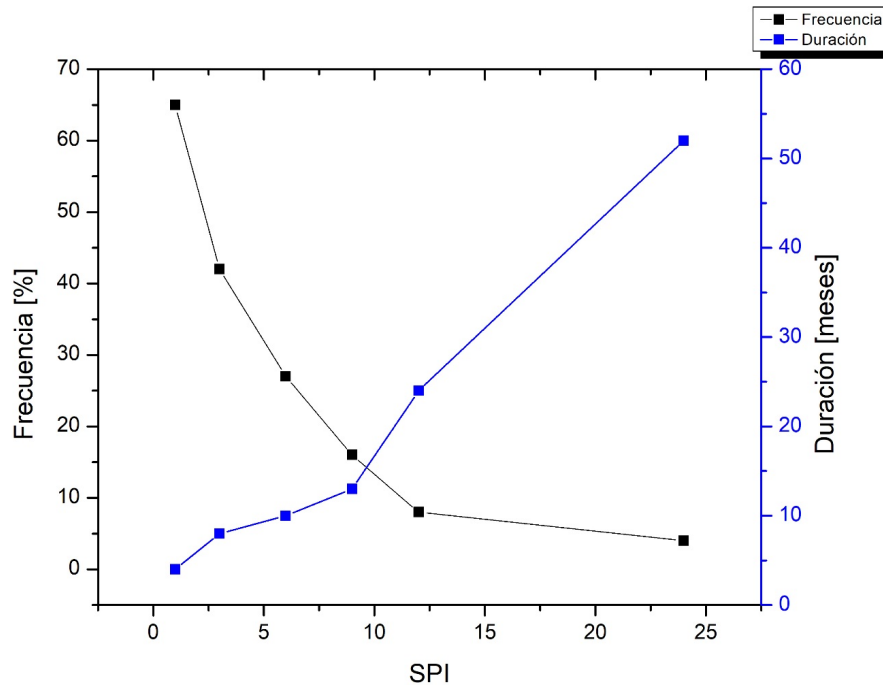


Figura 2. Evaluaciones elaborado a partir de Mishra *et al.* 2009 con alta variabilidad espacial.

tificar regiones con mayor tendencia a las sequías y se necesitó de información climatología local para evaluar el SPI.

Los I_{DS} son sensibles a los cambios en la localización de las estaciones y la exposición (Haylock *et al.* 2006). Por lo que, atender las dimensiones de un I_{DS} ofrece la cercanía de evaluaciones precisas y no aproximadas. Además de, que permite establecer su intensividad o extensividad y descartar el riesgo de generalizar los efectos de la sequía en sistemas bajo diferentes condiciones climáticas y geológicas. La temperatura es un factor preponderante que magnificar la sequía a diferencia de la velocidad del viento y la radiación solar incidente (Zhang *et al.* 2016). Por tanto, involucrar a PET en la formulación de los I_{DS} implica observaciones a escala microscópica para encontrar detalles del fenómeno, ya que la velocidad del viento y la radiación solar incidente se encuentran fuertemente vinculada a PET a través de la energía o calor latente (Campos-Aranda 2018). La precipitación y temperatura son variables de carácter macroscópico que al combinarse con PET producen heterogeneidades en la escala de observación del

fenómeno. Estos efectos han sido generalizados y la relevancia metodológica sobre la homogeneidad de datos en estaciones ha sido minimizada y poco atendida (Esteban-Parra *et al.* 1998, Goerlich 2012). El carácter complejo del estudio del fenómeno de sequía meteorológica (Heim 2002) podría ser la causa de la omisión de estos factores.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática reveló que los I_{DS} de mayor aplicación para estimar las singularidades de sequía meteorológica fueron SPI, SPEI, PDSI, RDI y CZI. Los resultados de los I_{DS} dependen de las dimensiones del sistema y significa que son extensivos. Además, de la metodología de observación, métodos de aproximación de datos y procesamiento numérico. Por lo que, la discontinuidad en la longitud de las series de datos, heterogeneidad espacial y ρ_e superiores o exponencialmente mayores a lo sugerido por la OMM generalizan los efectos de la sequía en los sistemas bajo diferentes condiciones

climáticas y geológicas. Además, se encontró que las heterogeneidades en la escala de observación que se generan al involucrar a PET en los I_D s contribuyen a

la complejidad que se tiene al estudiar el fenómeno de sequía meteorológica.

LITERATURA CITADA

- Abeyasingha NS and Rajapaksha URLN (2020) SPI-Based Spatiotemporal Drought over Sri Lanka. *Advances in Meteorology*. 2020 Article ID 9753279. DOI: 10.1155/2020/9753279.
- Adnan S, Ullah K, Shuanglin L, Gao S, Khan AH, Mahmood R (2018) Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Climate Dynamics* 51: 1885-1899.
- Al-Timimi YK and Al-Jiboori MH (2013) Assessment of spatial and temporal drought in Iraq during the period 1980-2010. *International Journal of Energy and Environment* 4: 291-302.
- Andrade-Velázquez M, Medrano-Pérez OR (2020) Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Bio Ciencias* 7: e905. DOI: 10.15741/revbio.07.e905.
- Asadi MA, Malekinezhad H, Mobin MH, Dastorani MT, Kousari MR (2011) Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management* 25: 3485-3504.
- Asadi MA, Sivakumar B and Sharma A (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI). *Journal of Hydrology* 526: 183-195.
- Aston L, Currie G, Delbosc A, Kamruzzaman M, Teller D (2021) Exploring built environment impacts on transit use - an updated meta-analysis. *Transport Reviews* 41: 73-96.
- Ayantobo OO, Li Y, Song S, Yao N (2017) Spatial comparability of drought characteristics and related return periods in mainland China over 1961-2013. *Journal of Hydrology* 550: 549-567.
- Belo-Pereira M, Dutra E, Viterbo P (2011) Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116: D20101. DOI: 10.1029/2010JD015481.
- Bong CHJ, Richard J (2019) Drought and climate change assessment using Standardized Precipitation Index (SPI) for Sarawak River Basin. *Journal of Water and Climate Change* 11: 956-965.
- Campos-Aranda DF (2017) Cuantificación de sequías meteorológicas mensuales: Cotejo de cuatro índices en tres localidades de San Luis Potosí, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua* 8: 159-172.
- Campos-Aranda DF (2018) Detección de sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada. *Tecnología y Ciencias del Agua* 9: 135-149.
- Choi M, Jacobs JM, Anderson MC, Bosch DD (2013) Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology* 476: 265-273.
- Cortez-Villa J, Quevedo-Nolasco A, Arteaga-Ramírez R, Carrillo-Flores G, Cortez-Villa J, Quevedo-Nolasco A, Arteaga-Ramírez R, Carrillo-Flores G (2020) Tendencia de la sequía meteorológica en el estado de Durango, México, por el método de Rodionov. *Tecnología y Ciencias del agua* 11: 85-131.
- Equipo Urbano (2007) El uso de Google Earth para el estudio de la morfología de las ciudades. I, Alcances y limitaciones. *Revista electrónica de recursos en Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona, España. <http://www.ub.es/geocrit/aracne/aracne-100.htm>. Fecha de consulta: 20 de abril de 2022.
- Dabanlı İ, Mishra AK, Şen Z (2017) Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey. *Journal of Hydrology* 552: 779-792.

- Daryanto A, Song Z (2021) A meta-analysis of the relationship between place attachment and pro-environmental behaviour. *Journal of Business Research* 123: 208-219.
- Dinku T, Ceccato P, Grover-Kopec E, Lemma M, Connor SJ, Ropelewski CF (2007) Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing* 28: 1503-1526.
- Dordević D, Jančíková S, Vítězová M, Kushkevych I (2021) Hydrogen sulfide toxicity in the gut environment: Meta-analysis of sulfate-reducing and lactic acid bacteria in inflammatory processes. *Journal of Advanced Research* 27: 55-69.
- Dutra E, Magnusson L, Wetterhall F, Cloke HL, Balsamo G, Boussetta S, Pappenberger F (2013) The 2010-2011 drought in the Horn of Africa in ECMWF reanalysis and seasonal forecast products: Drought in the HoA. *International Journal of Climatology* 33: 1720-1729.
- Easterling DR, Peterson TC, Karl TR (1996) On the development and use of homogenized climate datasets. *Journal of Climate* 9: 1429-1434.
- Elagib NA, Elhag MM (2011) Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology* 409: 612-625.
- Esteban-Parra MJ, Rodrigo FS, Castro-Diez Y (1998) Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology* 18: 1557-1574.
- Goerlich FJ (2012) Datos climáticos históricos para las regiones españolas CRU TS 2.1. *Investigaciones de Historia Económica* 8: 29-40.
- Guerreiro SB, Kilsby C, Fowler HJ (2017) Assessing the threat of future megadrought in Iberia. *International Journal of Climatology* 37: 5024-5034.
- Guttman NB (1998) Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 113-121.
- Guttman NB (1991) A sensitivity analysis of the palmer hydrologic drought index. *Journal of the American Water Resources Association* 27: 797-807.
- Harisuseno D (2020) Meteorological drought and its relationship with southern oscillation index (SOI). *Civil Engineering Journal* 6: 1864-1875.
- Hayes M, Svoboda M, Wilhite D (2000) Monitoring drought using the standardized precipitation index. Donald A (ed) *Wilhiteed drought: A Global assessment. Vol 1*. Routledge. Nebraska, USA. pp: 168-180.
- Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho OV (1999) Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429-438.
- Haylock MR, Peterson TC, Alves LM, Ambrizzi T, Anunciação YMT, Baez J, Barros VR, Berlato MA, Bidegain M, Coronel G, Corradi V, García VJ, Grimm AM, Karoly D, Marengo JA, Marino MB, Moncunill DF, Nechet D, Quintana J, Vincent LA (2006) Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* 1: 1490-1512.
- Heim RR (2002) A review of twentieth-century drought indices used in the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83: 1149-1166.
- Hobbins MT, Wood A, McEvoy DJ, Huntington JL, Morton C, Anderson M, Hain C (2016) The evaporative demand drought index. Part I: linking drought evolution to variations in evaporative demand. *Journal of Hydrometeorology* 17: 1745-1761.

- Huang S, Wang L, Wang H, Huang Q, Leng G, Fang W, Zhang Y (2018) Spatio-temporal characteristics of drought structure across China using an integrated drought index. *Agricultural Water Management* 218: 182-192.
- Jain VK, Pandey RP, Jain MK, Byun HR (2015) Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes* 8: 1-11. DOI: 10.1016/j.wace.2015.05.002.
- Karl TR, Koscielny AJ (1982) Drought in the United States: 1895-1981. *Journal of Climatology* 2: 313-329.
- Keyantash J, Dracup JA (2002) The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1167-1180
- Kim DW, Byun HR, Choi KS (2009) Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology* 378: 1-12. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.021.
- Kim U, Kaluarachchi JJ, Smakhtin VU (2008) Generation of monthly precipitation under climate change for the upper blue Nile river basin, Ethiopia 1. *Journal of the American Water Resources Association* 44: 1231-1247.
- Komuscu AU (1999) Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Network News* 11: 7 - 13.
- Li L, She D, Zheng H, Lin P, Yang ZL (2020) Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology* 21: 1513-1530.
- Li X, Sha J, Wang ZL (2019) Comparison of drought indices in the analysis of spatial and temporal changes of climatic drought events in a basin. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 10695-10707.
- Liebmann B, Bladé I, Kiladis GN, Carvalho LMV, Senay G, Allured D, Leroux S, Funk C (2012) Seasonality of African precipitation from 1996 to 2009. *Journal of Climate* 25: 4304-4322.
- Liu Y, Ren L, Hong Y, Zhu Y, Yang X, Yuan F, Jiang S (2016) Sensitivity analysis of standardization procedures in drought indices to varied input data selections. *Journal of Hydrology* 538: 817-830.
- Liu Z, Yao Z, Wang R (2016) Assessing methods of identifying open water bodies using Landsat 8 OLI imagery. *Environmental Earth Sciences* 75: 873. DOI: 10.1007/s12665-016-5686-2.
- Livada I, Assimakopoulos VD (2007) Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology* 89: 143-153.
- Mahajan DR, Dodamani BM (2016) Spatial and temporal drought analysis in the Krishna river basin of Maharashtra, India. *Cogent Engineering* 3(1): 1185926. DOI: 10.1080/23311916.2016.1185926.
- Malik A, Kumar A (2020) Meteorological drought prediction using heuristic approaches based on effective drought index: A case study in Uttarakhand. *Arabian Journal of Geosciences* 13(6): 276. DOI: 10.1007/s-12517-020-5239-6.
- Mishra AK, Singh VP, Desai VR (2009) Drought characterization: A probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23: 41-55.
- Mishra AK, Singh VP (2009) Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114. DOI: 10.1029/2008JD010986.
- Mohanta D, Soren J, Sarangi S, Sahu S (2020) Meteorological drought trend analysis by standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI): A case study of Gajapati District. *International Journal of Chemical Studies* 8: 1741-1746.

- Munson BR, Young DF, Okiishi T, Huebsch W (2006) *Fundamentals of fluid mechanics*. 6th Edition. Wiley. Iowa, USA. 778p.
- Nicholson SE (1986) The spatial coherence of african rainfall anomalies: interhemispheric teleconnections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 25: 1365-1381.
- Nicholson SE (1993) An overview of African rainfall fluctuations of the last decade. *Journal of Climate* 6: 1463-1466.
- NSIDC (2021) Rain at the summit of Greenland. *Greenland Ice Sheet Today*. <http://nsidc.org/greenland-today/2021/08/rain-at-the-summit-of-greenland/>. Fecha de consulta: 23 de agosto de 2021.
- Ntale HK, Gan TY (2003) Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology* 23: 1335-1357.
- Olivares BO, Zingaretti ML (2018) Análisis de la sequía meteorológica en cuatro localidades agrícolas de Venezuela mediante la combinación de métodos multivariados. *Cuadernos de Investigación UNED* 10: 192-203.
- Olivares BO, Cortez A, Lobo D, Parra RM, Rey BJC, Rodríguez MF (2016) Estudio de la sequía meteorológica en localidades de los llanos de Venezuela mediante el índice de Precipitación Estandarizado. *Acta Nova* 7: 266-283.
- Olukayode E (1985) A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology* 5: 655-664.
- OMM (2016) *Estado del clima mundial en 2011-2015*. WMO-1179. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. 32p.
- OMM (2012) *Standardized precipitation index user guide*. Organización Meteorológica Mundial. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768. Fecha de consulta: 27 de julio de 2021.
- Palmer WC (1965) *Meteorological drought*. Vol. 30. US Department of Commerce, Washington, USA. 58p.
- Paulo A, Martins D, Pereira LS (2016) Influence of precipitation changes on the spi and related drought severity: An analysis using long-term data series. *Water Resources Management* 30: 5737-5757.
- Peña-Gallardo M, Gámiz-Fortís SR, Castro-Diez Y, Esteban-Parra MJ (2016) Comparative analysis of drought indices in Andalusia during the period 1901-2012. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 42: 67-88.
- Penalba OC, Rivera JA (2015) Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. *Meteorológica* 40: 33-57.
- Potop V, Možný M (2011) The application a new drought index -standardized precipitation evapo-transpiration index in the czech republic. Edited by Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T. *Mikroklima a Mezoklima Krajinných Struktur a Antropogenních Prostředí Vol 2*. Skalní mlýn. Prague, Czech Republic. pp: 1-12.
- Potter MC, Wiggert DC, Ramadan BH (2012) *Mechanics of fluids SI version*. 4th edition. Cengage Learning. Stamford, USA. 785p.
- Quiring SM (2009) Monitoring drought: An evaluation of meteorological drought indices. *Geography Compass* 3: 64-88.
- Rafiei-Sardooi E, Mohseni-Saravi M, Barkhori S, Azareh A, Choubin B, Jafari-Shalamzar M (2018) Drought modeling: A comparative study between time series and neuro-fuzzy approaches. *Arabian Journal of Geosciences* 11(17): 487. DOI: 10.1007/s12517-018-3835-5.
- Rouault M, Richard Y (2003) Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales. *Water SA* 29: 489-500.

- Sardiñas SB, Leandro MF, González MR, González EYV (2019) La sequía meteorológica 2014-2017, características e impactos en la provincia Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología* 25: 319-333.
- Seiler RA, Hayes M, Bressan L (2002) Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology* 22: 1365-1376.
- She D, Xia J (2017) Copulas-based drought characteristics analysis and risk assessment across the loess plateau of China. *Water Resources Management* 32: 547-564.
- Soh YW, Koo CH, Huang YF, Fung KF (2018) Application of artificial intelligence models for the prediction of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at Langat River Basin, Malaysia. *Computers and Electronics in Agriculture* 144: 164-173.
- Sönmez F, Kemal AÜ, Erkan A, Turgu E (2005) An Analysis of Spatial and Temporal Dimension of Drought Vulnerability in Turkey Using the Standardized Precipitation Index. *Natural Hazards*. 35: 243-264.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2015) Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35: 4027-4040.
- Staudt M, Esteban-Parra MJ, Castro-Díez Y (2007) Homogenization of long-term monthly Spanish temperature data. *International Journal of Climatology* 27: 1809-1823.
- Tan C, Yang J, Li M (2015) Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Atmosphere* 6: 1399-1421.
- Tirivarombo S, Osupile D, Eliasson P (2018) Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 106: 1-10. DOI: 10.1016/j.pce.2018.07.001.
- Trenberth KE, Dai A, van der Schrier G, Jones PD, Barichivich J, Briffa KR, Sheffield J (2014) Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change* 4: 17-22.
- Vangelis H, Spiliotis M, Tsakiris G (2011) Drought severity assessment based on bivariate probability analysis. *Water Resources Management* 25: 357-371.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.
- Wang W, Wang J, Romanowicz R (2021) Uncertainty in SPI calculation and its impact on drought assessment in different climate regions over China. *Journal of Hydrometeorology* 22: 1369-1383.
- Wu C, Xian Z, Huang G (2015) Meteorological drought in the Beijiang River basin, South China: Current observations and future projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30: 1821-1834.
- Wu H, Svoboda MD, Hayes MJ, Wilhite DA, Wen F (2007) Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology* 27: 65-79.
- Yacoub E, Tayfur G (2016) Evaluation and Assessment of Meteorological Drought by Different Methods in Trarza Region, Mauritania. *Water Resources Management* 31: 825-845.
- Yang W, Cao Z, Lang Y (2021) Pollution status of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Northeastern China: A review and metanalysis. *Environmental Processes* 8: 429-454.
- Yang J, Chang J, Wang Y, Li Y, Hu H, Chen Y, Huang Q, Yao J (2017) Comprehensive drought characteristics analysis based on a nonlinear multivariate drought index. *Journal of Hydrology* 557: 651-667.
- Yao N, Li Y, Lei T and Peng L (2018) Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013. *Science of the Total Environment* 616: 73-89.

- Yu M, Li Q, Hayes MJ, Svoboda MD, Heim RR (2014) Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951-2010? *International Journal of Climatology* 34: 545-558.
- Yu W, Shao M, Ren M, Zhou H, Jiang Z, Li D (2013) Analysis on spatial and temporal characteristics drought of Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica* 33: 317-324.
- Zarei AR, Mahmoudi MR (2017) Evaluation of changes in RD1st index effected by different Potential Evapotranspiration calculation methods. *Water Resources Management* 31: 4981-4999.
- Zargar A, Sadiq R, Naser B, Khan FI (2011) A review of drought indices. *Environmental Reviews* 19: 333-349.
- Zhang Y, Li Z (2020) Uncertainty analysis of standardized precipitation index due to the effects of probability distributions and parameter errors. *Frontiers in Earth Science* 8: Article 76. DOI: 10.3389/feart.2020.00076.
- Zhang Y, Wang J, Shen Z, Xie X (2019) Evolution characteristics of seasonal drought in Hunan based on the standardized precipitation index (SPI). *Geoscience and Remote Sensing* 2: 56-64.
- Zhang J, Sun F, Xu J, Chen Y, Sang Y, Liu C (2016) Dependence of trends in and sensitivity of drought over China (1961-2013) on potential evaporation model. *Geophysical Research Letters* 43: 206-213.
- Zhao R, Wang H, Zhan C, Hu S, Ma M, Dong Y (2020) Comparative analysis of probability distributions for the Standardized Precipitation Index and drought evolution in China during 1961-2015. *Theoretical and Applied Climatology* 139: 1363-1377.