

Situación actual de los índices en uso para el estudio de la sequía

José Evelio Gutiérrez-Hernández ^(1*) y María Engracia Hernández-Cerda ⁽²⁾

^(1*) *Facultad de Geografía de la Universidad de La Habana, Cuba. joseevelio@geo.uh.cu* ⁽²⁾ *Instituto de Geografía de la UNAM, México. mehc@igg.unam.mx*

Recibido: mayo 16, 2016	Aceptado: septiembre 30, 2016
-------------------------	-------------------------------

Resumen

Se discute el uso de índices, como vía de estudio de este fenómeno. Se exponen las causas de su amplio empleo y las ventajas que presentan como método, no solamente para su estudio y evaluación, sino también para otros objetivos de alta prioridad, como la vigilancia y el control de su comportamiento. Se brinda un inventario actualizado y un análisis individual breve de la lista creciente de índices de sequía (IS) existentes; se empleó el método de investigación documental. Se ofrece una clasificación de cada uno, por tipo. Se realiza un balance y una valoración crítica de la situación actual de los cuatro tipos de IS reconocidos, atendiendo a su esfera de incidencia. Se destaca que los índices de sequía meteorológica son los más desarrollados y numerosos, y que la existencia de gran cantidad y variedad de IS contribuye a profundizar en las características del fenómeno, y además, escoger los índices apropiados en cada caso, acorde a los propósitos científicos deseados.

Palabras clave: métodos de estudio de la sequía, índices de sequía, ventajas de los IS, clasificación de los IS en uso, estado de desarrollo de los IS.

Current status of the indexes in use for the drought study

Abstract

The use of indexes is discussed as a way to study the drought phenomenon. Causes of their widespread use and advantages offered as a method are stated, not only for studying and evaluating the phenomenon in question but also for other high-priority objectives, such as monitoring and controlling their behavior. An updated inventory and a brief individual analysis of the growing list of drought indexes (DIs) expressed in the international scientific literature, are provided. In so doing, the documentary research method was used. An individual classification of each DIs by type is given. A critical assessment of the current status of the four types of recognized drought indexes, in keeping with the phenomenon's incidence area, has been carried out. It is emphasized that meteorological drought indexes are the most developed and numerous and that the existence of a large number and variety of them contributes to deepen the study of the different characteristics of the phenomenon, and also helps choose appropriate indexes in each case, according to their scientific or applied intended purposes.

Keywords: study methods of drought, drought indexes, advantages of DIs, classification of DIs in use, developmental state of DIs.

1. Introducción

La sequía equivale a una insuficiencia prolongada de precipitación en correspondencia con la norma o promedio habitual que esta manifiesta en un determinado lugar en un período de tiempo dado, lo cual suele provocar deficiente humedad en los suelos agrícolas y carencia de recursos hídricos en los territorios afectados, pudiendo tener impactos negativos en las comunidades humanas, en el ganado, en las cosechas agrícolas, en la producción agro-alimentaria y en otras importantes esferas económicas y sociales.

Gran cantidad de países de todos los continentes, sufren este fenómeno tan peligroso por su significado y extensión, manifestación lenta y progresiva pero dañina, que recurrentemente impacta de manera severa a los grupos sociales, al medio-ambiente y a todos los ámbitos de la actividad socio-económica, como se planteó anteriormente, de ocurrencia cada vez más frecuente debido a la intensificación de la variabilidad y cambio climáticos, por lo que es uno de los fenómenos más estudiados y monitoreados actualmente. Es decir, existe una preponderancia de los estudios dirigidos al problema de la sequía y del monitoreo de variables, encaminados a la mitigación de sus efectos.

Los índices de sequía constituyen hoy la vía más utilizada para acometer los estudios científicos, el seguimiento y la vigilancia de esta. Esto es válido para cualquiera de los diferentes tipos en que se subdivide o clasifica este fenómeno. Se refiere a la vigilancia meteorológica, agrícola, hidrológica, así como a los estudios de impacto económico o de tipo social, provocados por la misma. También coadyuvan al diagnóstico del estado de este fenómeno, así como a la toma de decisiones para las medidas de mitigación a tomar a consecuencia de sus efectos.

Hay un conjunto de razones objetivas y prácticas que determinan la preferencia y predominio del uso de los índices de sequía (IS), que se exponen en el trabajo.

Existen otros modos de estudios diferentes, actualmente en desarrollo, empleados también para estudiar este fenómeno, aunque se utilizan menos profusamente. Sin embargo, y no obstante, esos otros métodos sirven de modo complementario a los índices, al tiempo que permiten profundizar en la evaluación y explicación del fenómeno, o se combinan con ellos.

A lo largo de los años se han ido conformando una cantidad numerosa de indicadores de sequía, que se incrementa constantemente, relación que es actualizada en este trabajo y dentro de la cual sobresalen los índices de sequía meteorológica (ISM). Existen diversas clasificaciones de los IS que en su mayoría se basan en los "tipos principales" establecidos (Dracup, et al 1980; Wilhite y Glantz, 1985; Niemeyer, 2008). También aparecen en ocasiones otros criterios diversos, adicionales al aspecto tipológico, que revisten gran importancia e interés en tal sentido, y que permiten, así mismo, diferenciar y clasificar este fenómeno.

Algunos autores han presentado subdivisiones de los IS en diferentes trabajos aparecidos en la literatura científica internacional. Sin embargo, algunas de ellas resultan muy limitadas, y en ocasiones son intentos parciales o mal logrados. En este trabajo también se presenta una tabla clasificatoria de los IS por tipos, que intenta ampliar las expuestas por otros autores en los trabajos consultados, anteriormente publicados. También se expone de modo sintético la esencia y virtudes de cada uno de los índices referidos.

Destaca el hecho, de que se presenta un desigual nivel de avance en el uso de IS relativos a unos y otros ámbitos de incidencia del fenómeno, es decir entre los diferentes índices de sequía, tipológicamente hablando: Sequía meteorológica (SM), sequía agrícola (SA), sequía hidrológica (SH) y sequía socio-económica, que responde a diferentes causas, que se analizan aquí, más adelante.

Este trabajo se basa y se desarrolla a partir de la clasificación en tipos, de Wilhite y Glantz, 1985, la cual considera la existencia de cuatro tipos básicos de sequía: sequía meteorológica SM, sequía agrícola SA, sequía hidrológica SH, y sequía socio-económica SSE. Aunque existen también otras propuestas de clasificación, los "tipos de sequía" establecidos por estos autores son los universalmente reconocidos hoy, como los clásicos y esencialmente diferentes. A ellos cuatro, precisamente, corresponden los diferentes tipos de IS, analizados en este trabajo.

2. Índices e indicadores de sequía más conocidos

Hasta el presente, se han propuesto y aplicado numerosos y diferentes índices e indicadores para cuantificar y evaluar el comportamiento de la sequía, que suman más de cuatro decenas. Entre ellos, los difundidos en la literatura internacional, y conocidos en diferentes escenarios, son los siguientes:

Nombre del índice	Identificación	Procedencia
Índice de las Precipitaciones Estandarizadas	SPI	McKee et al. 1993
Índice Normalizado de Precipitación	NPI	Garrido, R., 1999
Índice de Precipitación Estandarizada Multivariada	MSPI	Bazrafshan, et al, 2014
Porcentaje de Precipitación Normal	PNP (MNDI)	Bhalme y Mooley, 1980
Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado	SPEI	Vicente-Serrano et al., 2010
Índice de Anomalía de Precipitación (respecto a la media)	RAI	Van Rooy, 1965
Índice de Anomalía de Precipitación respecto a la moda	AP _{M₀}	García y Hernández, 1988
Índice de Lluvias Dependientes o Tasa de Fiabilidad	TF	Le Houerou et al., 1993
Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica	IESP	Pita López, 2001
Índice de Sequía – Demanda	RDI	Weghorst, 1996
Índice Deciles de Precipitación	D	Gibbs y Maher, 1967
Índice de Severidad de la Sequía de Palmer	PDSI	Palmer, 1965
Índice de Severidad de la Sequía de Palmer Autocalibrado	SC-PDSI	Wells, 2004
Índice de Severidad de la Sequía de Tinajero	IS	Tinajero, et al., 1986
Índice Global de Sequía Anual	ISA	Gutiérrez, 2007
Índice de Persistencia de la Sequía	IPS	Gutiérrez, 2007
Índice de Repetibilidad de la S. Meteorológica	IR	Quintana y Álvarez, 2005
Índice de Aridez, de Hare y Ogallo	R	Hare y Ogallo, 1993
Índice de Aridez de Palfai	IAP/PAI	Palfai, 1984
Índice Z	ZINX	Karl, 1986
Índice de Precipitación Efectiva	EP	Byun y Wilhite, 1999
Índice de Sequía de Guerra y Almarza	IS	Guerra y Almarza, 1996
Índice de Sequía de Keetch-Byram	KBDI	Keetch-Byram, 1968
Índice de Sequedad	Si	Ped, 1975
Índice de Sequedad-Humedad	DM	Meshcherskaya y Blazhevich, 1997
Índice de Sequía por Humedad en el Suelo	MDSI	Hollinger et al., 1993
Índice de Humedad del Cultivo	CMI	Palmer, 1968
Índice de Sequía Específico de Cultivo	CSDI	Meyer et al., 1993
Índice de Potencial Agrohidrológico	IPAH	Petrasovits, 1984, 1990.
Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas	NDVI	Tucker, 1979
Índice de la Condición de la Vegetación	VIC	Kogan, 1990
Índice NDVI Estandarizado	SVI	Peters, et al., 2002
Índice de Salud de la Vegetación	VHI	Kogan 1990
Índice de Humedecimiento Modificado	IHN	Allen et al., 1998
Índice de Sequía Agrícola ó Índice Nacional de Lluvia	RI	Gommes y Petrassi, 1994
Índice de Sequía Agregado	ADI	Keyantash y Dracup, 2004
Índice de Sequía Oferta-Demanda	SDDI	Rind et al., 1990
Índice de Suministro de Agua Superficial	SWSI	Shafer y Dezman, 1982
Índice Hidrológico de Sequía de Palmer	PHDI	Palmer, 1965
Índice de Déficit de Humedad	SMDI	Narasimhan y Srinivasan, 2005
Índice de Déficit conjunto (Joint Deficit Index)	JDI	Kao y Govindaraju, 2010

Ellos se diferencian entre sí por muchos aspectos: por su tipología (índices de tipo meteorológico, agrícola, hidrológico), por su simplicidad o complejidad, por el número de parámetros que utiliza, por el grado de información que requieren para su cálculo, por su efectividad, por las limitaciones de su aplicación, entre otros.

Todos los índices son importantes, aunque algunos son más conocidos, más empleados, o ambas cosas; otros se conocen poco; otros son solamente válidos para determinadas condiciones climáticas o físico-geográficas particulares (zonas desérticas o semidesérticas, zonas de clima semi-húmedo, clima no estacional, relieve homogéneo, etc); otros

toman como referencia parámetros locales de las variables involucradas, y por tanto, son de carácter local, por lo que no son aplicables en cualquier zona geográfica. Pueden tomarse como ejemplos: el PDSI, no apropiado para zonas con alta variación del relieve, la Desviación Estandarizada de Precipitación, no adecuada para territorios con alta variabilidad pluviométrica, o el Índice de Precipitación Efectiva, no apropiado para climas con precipitación estacional.

3. Situación comparada de los tipos de índices

Como se expresa al inicio, existe un conjunto de razones objetivas y prácticas que determinan la preferencia y predominio del uso de los índices de sequía (IS) para abordar los estudios científicos así como el seguimiento de la misma.

Los índices constituyen un método fácil y directo, y son una vía práctica y rápida para conocer el comportamiento y las manifestaciones del fenómeno. Así mismo, contribuyen también, de una manera eficaz y directa, al monitoreo, control y vigilancia de este tipo de fenómeno; o sea, son de carácter muy operativos; de aquí la extensión de su uso y la variedad que presentan.

Dentro de los cuatro tipos de índices, son los ISM los más abundantes y desarrollados. Es decir, la mayoría de los índices existentes hoy, son utilizados para evaluar la SM (ISM). Como se aprecia en el tópico anterior y en la tabla de clasificación, las tres cuartas partes de los índices que se manejan actualmente, corresponden a ISM.

Los índices de sequía agrícola e hidrológica también poseen buen desarrollo, en correspondencia con la importancia económica y vital de ambas esferas humanas, así como al desarrollo tecnológico que existe apegado a las mismas. Estos dos tipos de índices, aunque presentan una cantidad numérica inferior a los primeros, son suficientes y eficaces y se emplean con frecuencia, principalmente en los países del primer mundo y en algunos otros.

Contrariamente a la cantidad existente y al desarrollo que presentan actualmente los IS, y especialmente los ISM, los referidos a la sequía socio-económica (ISSE) están muy poco desarrollados. Otros autores también se han referido a esta deficiencia y grave problema.

Es de destacar que existen índices diversos para la evaluación de impactos SE, que son generalmente utilizados para otros propósitos, y que pudieran utilizarse o adaptarse para evaluar la denominada sequía de tipo socio-económica (evaluar también, mediante índices, la SSE), pero se ha avanzado muy poco aún en esta dirección. Esto, entre otras razones, se debe a que este ámbito de análisis es muy amplio y complejo. Dicho de otro modo, existen índices de tipo socio-económico (ISE), pero corresponden a otras ramas de las ciencias, sociales fundamentalmente. Y si bien se han hecho intentos de emplear algunos de ellos, en verdad más bien constituyen “Índices de Impacto SE, provocados por la Sequía”, y No IS en sí.

Debido a lo anteriormente expuesto, se requiere el acometimiento y ampliación de los estudios en tal sentido, y especialmente proponer índices específicos para evaluar la Sequía SE, directamente vinculados a la carencia del recurso hídrico y a la afectación directa de la sequía en actividades económico-sociales de diverso tipo. Esto constituye un importante reto dentro de esta esfera científica.

4. Clasificación tipológica de los índices de sequía

Los IS constituyen una vía, un método y una herramienta práctica y simple para estudiar el comportamiento de este fenómeno con un enfoque cuantitativo. Pocas ramas de las ciencias poseen un arsenal tal de indicadores, como los formulados y en uso actual, para el estudio de la sequía.

Aun cuando hay parecido entre algunos de esos índices, de modo general ellos reflejan aspectos diferentes del fenómeno, necesarios para diferentes propósitos de uso; de ahí la utilidad de cada uno de ellos: contribuyen a evaluar aspectos particulares vinculados con la sequía, diagnosticar el estado del fenómeno o evaluar formas de impacto de la misma.

Generalmente los indicadores de sequía se clasifican teniendo en cuenta el tipo de variables que involucran y en consecuencia el tipo de sequía a que hacen referencia. Pero la clasificación de estos bajo el criterio tipológico (tipo de sequía asociada) es difícil, ya que hay numerosos índices que presentan clara identidad, pero otros no; especialmente

los índices mixtos, bi-temáticos o multi-temáticos, que no utilizan un solo tipo de variable tipológica, sino varias. Estos, permiten evaluar, no solamente un tipo de sequía, sino varias a su vez, por lo que, consecuentemente, resultan difícil de catalogarse con nitidez. En consecuencia podrían denominarse de tal manera (índices mixtos), pero usualmente se clasifican por los diferentes tipos a la misma vez (hidrológico y meteorológico, por ejemplo), para definir directa y explícitamente los tipos de sequía a los que ellos tributan.

A continuación se catalogan los diferentes índices, atendiendo al tipo de sequía que están destinados a evaluar:

Nombre del índice	Identificación	Tipo de sequía asociada		
		Meteorológica	Agrícola	Hidrológica
Índice de las Precipitaciones Estandarizadas	SPI	M		
Índice Normalizado de Precipitación	NPI	M		
Índ. Precipitación Estandarizada Multivariada	MSPI	M		
Porcentaje de Precipitación Normal	PNP	M		
Índ. Precipitación Evapotranspiración Estandarizado	SPEI	M		
Índ Anomalía de Precipitación (respecto a la media)	RAI	M		
Índ de Anomalía de Precipitación respecto a la moda	AP _{MO}	M		
Índice de Lluvias Dependientes o Tasa de Fiabilidad	TF		A	
Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica	IESP	M		
Índice de Sequía - Demanda	RDI			H
Índice "D" o Deciles de Precipitación	D	M		
Índice de Severidad de la Sequía de Palmer	PDSI	M	A	
Índ Severidad de la Sequía de Palmer Autocalibrado	SC-PDSI	M	A	
Índice de Severidad de la Sequía de Tinajero	IS	M		
Índice Global de Sequía Anual	ISA	M		
Índice de Persistencia de la Sequía	IPS	M		
Índice de Repetibilidad de la Sequía Meteorológica	IR	M		
Índice de Aridez, de Hare y Ogallo	R	M		
Índice de Aridez de Palfai	IAP	M	A	
Índice Z	ZINX		A	
Índice de Precipitación Efectiva	EP	M		
Índice de Sequía de Guerra y Almarza	IS	M		
Índice de Sequía de Keetch-Byram	KBDI	M		
Índice de Sequedad de Ped	Si	M		
Índice de Sequedad-Humedad	DM	M		
Índice de Sequía por Humedad en el Suelo	MDSI			H
Índice de la Humedad del Cultivo	CMI		A	
Índice de Sequía Especifico de Cultivo	CSDI		A	
Índice de Potencial Agrohídrológico	IPAH		A	
Índice de Vegetación Diferencias Normalizadas	NDVI	M	A	
Índice de Condición de la Vegetación	VIC	M	A	
Índice NDVI Estandarizado	SVI	M	A	
Índice de Salud de la Vegetación	VHI	M	A	
Índ. Humedecimiento Modif ó de Disponib Hídrica	IHN		A	
Índ de Sequía Agrícola ó Índice Nacional de Lluvia	RI	M		

Índice de Sequía Agregado	ADI	M	A	H
Índice de Sequía Oferta-Demanda	SDDI	M		
Índice de Suministro o aporte de Agua Superficial	SWSI			H
Índice Hidrológico de Sequía de Palmer	PHDI			H
Índice de Déficit de Humedad	SMDI		A	
Índice de Déficit Conjunto	JDI	M		H

Algunos índices evalúan variables de tipos edáficas, hidro-edáficas o hidro-agrícola, pero todas ellas tributan a la sequía agrícola. Los índices de sequía hidrológica presentan mejor definición, pues utilizan componentes y variables hidrológicas o hidro-climáticas.

Nota: No aparecen aquí índices relativos a la sequía SE, por la carencia de indicadores de este tipo, bien definidos y elaborados.

5. Características y análisis breve de los índices de sequía

A continuación se ofrece una sinopsis o descripción breve de cada uno de los índices referidos:

Índice de las Precipitaciones Estandarizadas SPI

Propuesta por McKee et al., 1993.

Calcula las desviaciones estándar de cada registro o valor de precipitación mediante la distribución Gamma. Las probabilidades son transformadas en series normalizadas con media cero y desviación estándar 1. Se recomienda para registros de largo plazo. Los valores superiores al promedio histórico del mes correspondiente, darán valores del SPI positivos, esto representa condiciones de humedad; mientras que registros de precipitación inferiores al promedio histórico del mes correspondiente, arrojarán valores del SPI negativos, lo cual indica una intensidad en el déficit de humedad. Permite estudiar diferentes escalas de tiempo, identificar diferentes tipos de sequía. Es el índice más utilizado mundialmente.

Índice Normalizado de Precipitación NPI

Garrido R., 1999.

Se apoya en los índices SPI y PDSI, combinando las ventajas de ambos: la ventaja de la estandarización del primero y el poder descriptivo del PDSI. Es aplicable a cualquier escala de tiempo, aunque originalmente se aplicó para el período mensual. Permite distinguir cuatro clases o categorías de sequía: suave entre -1 y -1.99, moderada entre -2 y -2.99, severa entre -3 y -3.99 y extrema para valores igual o inferiores a -4.

Índice de Precipitación Estandarizada Multivariada – MSPI

De Bazrafshan et al., 2014.

Consiste en realizar una aproximación multivariada que tiene la capacidad de agregar una variedad de series de tiempo SPI en una nueva serie de tiempo llamado índice de precipitación estandarizado multivariado. Está basado en un análisis de componentes principales de las series de tiempo del SPI en una localidad determinada. Obtenido el primer componente principal PC1 de los registros, el índice (MSPI) se obtiene al dividir los valores del PC1 por la desviación estándar mensual. Se sugiere emplear cinco clases de escalas de tiempo: 3-6, 6-12, 3-12, 12-24 y 24-48 meses. Este método se recomienda utilizarlo cuando la agregación de las escalas de tiempo para calcular el SPI no son previamente conocidas.

Porcentaje de Precipitación Normal PNP

De Bhalme y Mooley, 1980. (También denominado MNDI).

Está diseñado para calcular las desviaciones de la precipitación anual en un lugar o región determinada, en forma porcentual. Se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones anuales ocurridas en un periodo no menor de 30 años. Es muy fácil de aplicar y muy práctico. Se puede practicar para diferentes períodos o escalas de tiempo, lo que es ventajoso. Es uno de los índices más usados. No permite establecer bien las fechas o límites de ocurrencia de la sequía.

Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado SPEI

De Vicente-Serrano et al., 2010

Se basa en registros de precipitación y evapotranspiración potencial. Combina la sensibilidad del PDSI a los cambios de demanda de evaporación, con la simplicidad de cálculo y el carácter multi-temporal del SPI. Supera al SPI en que el cálculo de este se basa solamente en datos de precipitación, que muchas veces presenta carácter estacional, y no considera otras variables que también influyen en las condiciones de sequía. Sin embargo los efectos del proceso de calentamiento presentan peso en el fenómeno de la sequía, según evidencian estudios recientes. Otros índices, y en particular el PDSI supera esto, pero carece del carácter multiescalar fundamental para la evaluación de la sequía en los distintos sistemas y para diferenciar entre tipos de sequía. El SPEI parece mejorar estas deficiencias y superar el Índice de Palmer.

Índice de Anomalía de la Precipitación – RAI

De Van Rooy, 1965

Permite evaluar la sequía meteorológica. Compara la precipitación de un lugar y momento determinados con la media de los diez valores extremos de precipitación, de anomalía positiva y negativa (diez valores máximos y diez valores mínimos). Se calcula a escala semanal, mensual o anual. La elección de la escala se realiza sobre la base de la distribución de la precipitación. Es útil y sencillo pero ha sido poco utilizado, por lo que existe poca experiencia acerca de su efectividad (Citado en Mishra and Singh, 2010; Zargar et al 2011).

Índice de Anomalía de Precipitación respecto a la moda

De García y Hernández, 1988

Tiene su base en la fórmula: Anomalía (%) = $(X_i - M_o / M_o) 100$; donde: X_i es el valor de la precipitación de cada año y M_o la moda del periodo estudiado, obtenida a través de la distribución Gamma. Las anomalías negativas significan que en el año en que se presentaron, la precipitación fue menor que la moda, lo que indica que fue un año seco. Permite distinguir en tal caso, tres niveles diferentes: secos, muy secos y secos en extremo.

Índice de Lluvias Dependientes DR, o Tasa de Fiabilidad TF

De Hargreaves, 1974.

Define a las lluvias dependientes como aquellas que se producen en tres de cada cuatro años (percentil 75), a partir de cuyo valor la producción agrícola queda comprometida, por lo que este sirve de límite para definir sequía agrícola. Otros autores posteriormente modificaron el valor del parámetro, utilizando como límite el percentil 80, es decir cuatro de cada cinco años (Dancette y Hall, 1979 y Le Houérou et al, 1993, citados en Valiente, 2001). Una variación de este índice es la tasa de fiabilidad, que establece la relación existente entre las lluvias dependientes y la precipitación promedio, (Valiente, op cit.).

Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica - IESP

De Pita López, 2001

Determina la anomalía pluviométrica mensual a partir de restar al valor del mes x, el promedio mensual de ese mismo mes; luego determina las anomalías pluviométricas acumuladas desde el primer mes de la serie observada, y finalmente estandariza las anomalías acumuladas mediante su conversión en puntuaciones, denominadas puntuaciones Z. Utiliza tres expresiones de cálculo. Describe por igual las sequías de diferentes duraciones, por lo que se plantea que es mejor que SPI que es más útil para sequías cortas.

Índice de Sequía-Demanda RDI o Índice USBR de la Sequía

De Weghorst, 1996 ó del Buró de Reclamación de E.U.

Determina la intensidad y duración de la sequía, su inicio y fin. Se calcula para el entorno de una cuenca hidrográfica. Basa sus cálculos en las precipitaciones, la masa de nieve, el escurrimiento y el volumen de los embalses. Permite adaptarse a cualquier región de estudio o condiciones físicas. Tiene implícitamente en cuenta el factor clima y el factor hidrológico.

Índice “D” o Método de Deciles de Precipitación D

De Gibbs y Maher, 1967

Es un indicador que se utiliza para monitorear la sequía. Fue desarrollado con base en el análisis estadístico de las series de los acumulados de lluvia, mediante la distribución de percentiles, para evitar algunas de las debilidades del índice Por-ciento de la Precipitación Normal.

Su uso como índice posee la utilidad práctica de que ellos expresan el grado de la lluvia sobre un período dado dentro de la distribución de frecuencia, sin especificar la cantidad de lluvia.

Consiste en ordenar los datos de precipitación mensual en deciles. Divide la distribución de ocurrencias de registros de precipitación a largo plazo, en décimos de la distribución. Cada una de estas categorías es un decil. El primer decil es la cantidad de lluvia no excedida por el 10% más bajo de las ocurrencias de precipitación. El segundo decil es la cantidad de precipitación no excedida por el 20 % más bajo de las ocurrencias. Estos deciles continúan hasta que la cantidad de lluvia identificada por el décimo decil es la cantidad de precipitación más grande dentro del registro de largo plazo. Por definición el quinto decil es la mediana, y es la cantidad de precipitación que no exceda el 50 % de las ocurrencias sobre el periodo de registro. Los deciles son agrupados en cinco categorías.

Índice de Severidad de la Sequía PDSI.

De Palmer, 1965

Es un algoritmo que permite medir la pérdida de humedad del suelo. Se basa en el concepto de suministro de agua y se apoya en la capacidad de campo del suelo como condición de humedad. Evalúa la pérdida de humedad y el balance hídrico del suelo. Proporciona medidas estandarizadas de condiciones de humedad. Facilita comparaciones para diferentes períodos de tiempo y entre diferentes condiciones locales. Permite definir el inicio y fin de la sequía o de un período húmedo. Es apropiado para lugares de topografía uniforme. No está diseñado para grandes variaciones del relieve y no considera la acumulación de nieve y su subsecuente escorrentía. Es un índice de equilibrio o balance de agua que considera el suministro de agua (precipitación), demanda (evapotranspiración) y pérdida (escurrimiento).

Asimismo, se determinó la precipitación necesaria para mantener la humedad climática normal.

$$P_n = a \text{ ETP} + (b \text{ PR}) + (g \text{ Pro}) + (d \text{ PL})$$

La diferencia entre precipitación calculada y real, Palmer la definió como desviaciones de humedad d , $d = P - P_n$. Cuando los períodos son húmedos, estas desviaciones son positivas y cuando los períodos son secos, los d son negativos. Palmer obtuvo un índice de anomalía de humedad Z multiplicando los valores d por una constante k determinada para cada lugar y para cada período: $Z = d * k$. Con los valores de anomalía de humedad Z (en milímetros) se determina un índice de sequía mensual x (adimensional). Es uno de los índices más conocidos.

Índice de Severidad de la Sequía de Palmer Autocalibrado (Self calibrated PDSI) – SC-PDSI

De Wells and Goddard, 2004.

Calibra automáticamente el comportamiento del índice en cualquier ubicación mediante la sustitución de constantes empíricas en el cálculo del índice con valores calculados dinámicamente. Esto se logra mediante la ponderación correcta de la característica climática, que afecta a la gama de valores PDSI, y el cálculo automático de los factores de duración, que ajusta la sensibilidad del índice. Emplear una escala simétrica en sus valores extremos, positivos y negativos. Estas dos modificaciones hacen posible que el índice se comporte de una forma consistente y predecible, así mismo permiten representar de manera más realista los climas de diversos lugares Su aplicación en diferentes Estados USA muestra, según reportan sus autores, que es más comparable espacialmente que el PDSI, y los informes de extremas condiciones húmedas y secas, con frecuencias que se esperaría para condiciones raras. O sea, es más sensible a las diferencias de las condiciones climáticas locales y a las situaciones de deficiencia hídrica que el PDSI

Índice de Severidad de la Sequía de Tinajero IS

De Tinajero, et al., 1986

Este índice se calcula con base en datos mensuales de precipitación a través de la siguiente fórmula:

$IS = \frac{\sum Y - \sum X}{\sum X}$, en donde IS es el índice de Severidad de la Sequía, Y es igual a la precipitación mensual registrada y X es la precipitación media total del periodo analizado. La $\sum Y$ se obtiene a partir de la suma de los valores de las Y mensuales, cuando ésta es menor que X . La $\sum X$ es la suma de los valores de X que fueron mayores a Y . Por último se toma el valor absoluto resultante.

Índice Global de Sequía Anual - ISA

De Gutiérrez, José E., 2007

Tiene por objetivo determinar la intensidad o severidad de la sequía a partir del déficit pluviométrico y a su vez, de la extensión de ausencia de precipitación; esto es, de la cantidad máxima de días sin lluvia. Permite detectar la ocurrencia y definir la magnitud de eventos extremos.

Basa su cálculo en la precipitación anual, la norma o valor promedio anual, la cantidad total de días sin lluvia en el año y la cantidad máxima de días consecutivos sin registro pluviométrico en ese periodo de tiempo. Significa que valora e integra dentro de la expresión, diferentes variables importantes asociadas con la carencia de precipitación. Permite establecer cinco categorías para evaluar la magnitud del fenómeno, entre ligera y muy severa.

Índice de Persistencia de la Sequía - IPS

De Gutiérrez, José E., 2007

Basa su cálculo en tres variables específicas que integran la expresión: precipitación anual, precipitación media anual y cantidad consecutiva de años secos antecedentes. Permite definir en qué medida es persistente el fenómeno para el lugar evaluado, teniendo en cuenta el déficit de precipitación de cada año en cuestión y la manifestación antecedente de este fenómeno en los años previos. Establece cinco rangos posibles para catalogar la magnitud de la persistencia de sequía: nula, baja, moderada, alta y muy alta.

Índice de Repetibilidad de la Sequía Meteorológica – IR

De Quintana y Álvarez, 2005

Se evalúa a partir de la frecuencia con que se manifiesta el fenómeno de la sequía en un territorio dado, lo cual está en dependencia de la escala temporal en que se analice la misma, ya sea diaria, mensual, anual, etc. Algunos investigadores han desarrollado el análisis de este comportamiento de la sequía sobre la base del cálculo de las anomalías interanuales estandarizadas, o índices de intensidad anual (Z_{ij}), de amplio uso internacional (Ogallo y Nassib, 1984, citado en Álvarez et al, 2005), expresado como: $Z_{ij} = (X_{ij} - X_j) / S_j$

Donde X_{ij} representa el total anual de la lluvia en la estación j en el año i ; X_j y S_j son la media y la desviación estándar del período seleccionado. Los rangos que caracterizan las anomalías negativas como débiles (D) o no significativas, moderadas (M) y severas (S), se precisan multiplicando el cociente X_j / S_j por los coeficientes $K_{max} = -0.15$ y $K_{min} = -0.30$

Índice de Aridez – R

De Hare y Ogallo, 1993

Se le considera el índice climático para caracterizar la aridez del paisaje. Equivale a la razón de la Precipitación y la Evapotranspiración potencial: $R = P / E_o$

P es la Precipitación y E_o la Evapotranspiración potencial. Este índice es recomendado por el PNUMA y fue utilizado en la evaluación de la aridez a nivel global (UNEP, 1992) y actualmente es el adoptado por la "Convención Internacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía". Depende de factores exclusivamente climáticos (no toma en cuenta las características hidro-físicas del suelo y la vegetación): temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, insolación media (horas-luz), humedad relativa, velocidad del viento y precipitación.

Índice de Aridez – IAP/PAI

De Palfai, 1984

Es usado para caracterizar la intensidad de la aridez mediante un solo dígito, a partir de un número reducido de parámetros meteorológicos e hidrológicos. Fue diseñado para Hungría. En su fórmula básica divide la temperatura media del aire ($^{\circ}C$) del período entre abril y agosto, entre la precipitación total (mm) obtenida como suma de los valores mensuales ponderados entre octubre y agosto, y se multiplica por 100. Los pesos mensuales de los valores de precipitación se basan en las condiciones de almacenamiento de humedad y en los cambios de la demanda general de agua por los cultivos, según tabla definida por su autor. El mes de julio es el período más crítico, desde el punto de vista de suministro de agua. Para expresar el índice con mayor exactitud se deben realizar correcciones en base a determinados factores específicos, de: temperatura, precipitación y profundidad de las aguas subterráneas. Los valores menores, para un lugar concreto, corresponden a años húmedos, mientras que los superiores indicarían diferentes grados de severidad de la sequedad: 6 a 8 Sequía Moderada, 8 a 10 Sequía Media, 10 a 12 Sequía Severa y mayor que 12 Sequía Extrema. El indicador se puede utilizar para hacer comparaciones entre situaciones húmedas y/o secas de diferentes períodos así como de diferentes áreas, y también es válido para fines de predicción, siempre y cuando el cálculo de los valores del PAI se haga de manera continuada. Para una mejor caracterización de la situación de la sequía de una determinada zona agrícola o de una masa de cultivo, es aconsejable utilizar este indicador junto con el Índice de Potencial Agrohidrológico. (Citado en Niemeyer, 2008; Morales, 2005).

Índice Z - ZINX

De Palmer 1965 (Karl, 1986)

Mide la anomalía mensual de humedad en un área, para un mes predeterminado. Se utiliza específicamente para evaluar sequía agrícola, debido a que responde con facilidad a anomalías negativas de humedad de corta duración y permite detectar los máximos de precipitación durante un período de sequía, ya sea meteorológica o hidrológica, que favorecen una producción agrícola próxima a la correspondiente a un año medio o normal. En tal caso ZINX toma valor positivo, indicando el final de la sequía agrícola. Algunos autores expresan que, para un seguimiento en tiempo

real de las condiciones de sequía, el índice Z es más adecuado que el PDSI o el PHDI, al reflejar más fielmente las variaciones más inmediatas. Establece tres intervalos o rangos de interés: sequía débil a moderada, sequía fuerte y sequía extrema.

Índice de Precipitación Efectiva - EP

De Byun y Wilhite, 1999

Este índice utiliza tres expresiones diferentes, cada una de las cuales sirve para establecer un factor de reducción temporal diferente. Trabaja con la precipitación diaria. Computa diariamente, la precipitación efectiva promedio, la desviación de precipitación efectiva, la diferencia entre precipitación efectiva y la precipitación efectiva promedio, la precipitación efectiva estandarizada, y el cociente entre la desviación de precipitación efectiva y la desviación típica de la precipitación efectiva. Cuantifica la sequía mediante un conjunto de índices específicos diversos referidos al acumulado del déficit de precipitación, de valores negativos de precipitación efectiva estandarizada, índice de sequía efectiva y otros. Aún exhibe pocos resultados aplicativos pero dio resultados satisfactorios en Nebraska, USA. Permite hacer un seguimiento de la evolución de la sequía en tiempo real.

Índice de Sequía – IS

De Guerra y Almarza, 1996

Calcula este indicador a través del producto de dos factores determinantes: el Déficit Hídrico F1 y la Persistencia o carencia pluviométrica F2, de modo que $IS = F1 \cdot F2$. El F1 equivale al cociente entre la diferencia del valor medio de las precipitaciones de los doce meses anteriores y el valor medio mensual. F2 es un factor de incremento del producto en función de la cantidad de meses anteriores con déficit hídrico. Permite determinar episodios extremos con estas características, aunque no posibilita determinar la intensidad relativa del evento en sí. (Citado en Valiente, 2001).

Índice de Sequía de Keetch-Byram – KBDI

De Keetch-Byram, ó del Servicio Forestal de EU (USDAFS), 1968

Del Servicio Forestal de los EU

Es un valor numérico que refleja la sequedad de la capa superior de los suelos. Es expresado en una escala numérica de 0 a 800. Los límites de intervalos de este índice determinan las características de la capa superior del suelo y su contribución a la intensidad de los incendios forestales. Utiliza en sus cálculos las variables: temperatura máxima diaria, precipitación diaria, precipitación antecedente y precipitación anual (citado en Zargar, et al 2011).

Índice de Sequedad – Si

De Ped, D.A., 1975

Refleja la diferencia entre el cociente de las anomalías y la desviación típica de las anomalías de precipitación y temperatura. Fue aplicado en la antigua Unión Soviética con buenos resultados. Utiliza la expresión: $S_i = (\Delta T / \delta \Delta T) - (\Delta Q / \delta \Delta Q)$; o sea, anomalía de temperatura entre desviación típica de las anomalías de temperatura, restado por el cociente entre las anomalías de precipitación y la desviación típica de la precipitación. Es un indicador valioso e interesante (citado en Valiente, 2001).

Índice de Sequedad-Humedad – Índice DM

De Meshcherskaya y Blazhevich, 1997

Evalúa condiciones secas y humedad excesiva. Fue creado para el área productora de grano en la exURSS. Es un índice espacial basado en dos fórmulas, una para calcular las condiciones de sequedad (Índice D) y otro para el exceso de humedad (Índice M). Es apropiado cuando se manifiesta una correlación negativa entre precipitación y temperatura en condiciones climáticas de alta latitud. Recomienda establecer los umbrales a partir de los cuales un determinado período es seco (precipitación inferior a un 80% de la media y anomalía positiva de temperatura superior a 1°C) o húmedo (precipitación superior a un 120% de la media y anomalía negativa de temperatura superior a 1°C). Para que el período en una determinada estación sea calificado como seco o húmedo, deben cumplirse simultáneamente las dos condiciones; cabe la posibilidad de una situación neutra. Los umbrales de temperatura limitan un intervalo de normalidad ($\pm 1^\circ\text{C}$) donde se sitúan un 40% de los valores, mientras el 60% restante se reparte entre los dos extremos superior e inferior. Una vez establecida la situación de cada estación, los Índices D y M son sometidos a una media areal, obteniendo como resultado el porcentaje de territorio afectado por condiciones de sequía o humedad para el período considerado (originalmente los autores lo aplicaron para el período de mayor crecimiento del cereal. El Índice DM se obtiene por la diferencia entre los dos indicadores: si el valor es positivo, el área padece sequía, si es negativo, predominan las condiciones de humedad. En función de las características climáticas de la región a la que se aplique,

se proponen diferentes umbrales de referencia para clasificar los períodos en tres intervalos: seco, normal y húmedo, cada uno de los cuales se reparten el 33% de las ocurrencias

Índice de Sequía por Humedad en el Suelo – MDSI/SMDI

De Hollinger et al., 1993

Evalúa las anomalías de humedad anual en el suelo, al relacionarlas con la sumatoria del valor diario de humedad en el suelo a lo largo de un año. Casi no se conoce, lo que no permite hacer valoraciones acerca de este indicador ni comparar sus resultados con otros (citado en Byun and Wilhite, 1999).

Índice o Indicador de Humedad del Cultivo - CMI

De Palmer, 1968. Las siglas, en su idioma original, significan: Crop Moisture Index

Se basa en el PDSI pero utiliza un planteamiento meteorológico para hacer un seguimiento semanal de las condiciones de los cultivos. Hace un seguimiento (evalúa) las condiciones de humedad a corto plazo, en las principales zonas dedicadas a la actividad y producción agrícolas. Es utilizado estrictamente para medir la intensidad de la sequía agrícola. Se basa en datos de temperatura media semanal y precipitación total, y en el valor del CMI de la semana anterior. Es sensible a variaciones de esas variables. No es apropiado para evaluar sequía meteorológica.

Índice de Sequía Específico de Cultivo - CSDI

De Meyer et al., 1993.

Equivale al cociente entre la sumatoria de la evapotranspiración calculada para el período de crecimiento de determinados cultivos, y la evapotranspiración promedio correspondiente al mismo período. Se aplica para cultivos específicos, de ahí su denominación según el cultivo de que se trate. Es decir: para cada cultivo toma una nomenclatura específica, según la letra inicial del nombre del cultivo en idioma inglés: ej Maiz- CDI (Corn Drought Index), Soya-SDI (Soybean Drought Index) y así sucesivamente.

Índice de Potencial Agro-hidrológico - IPAH

De Petrasovits, 1984, 1990.

Se basa en la evapotranspiración real E_{Tr} y óptima E_{To} ; es decir: equivale a la relación entre la evapotranspiración real de un cultivo, y la evapotranspiración óptima del mismo. Marca la demanda de agua como la capacidad de una zona de satisfacer las necesidades de un cultivo concreto, mediante el cociente entre agua consumida y demanda requerida. Evalúa de modo cuantitativo y directo los dos parámetros básicos que determinan la relación de satisfacción de la demanda de agua de un cultivo determinado. Es un indicador útil para expresar la frecuencia de las sequías y de los diferentes grados de escasez de agua (citado en Lakshmi, et al 2012; Cruz et al 2014).

Índices de Percepción Remota (para evaluación de sequía) – NDVI, VHI y otros

Comprende varios índices soportados en el uso de imágenes de satélite, a través de la percepción remota. Los más conocidos son el Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas NDVI y el Índice de Salud de la Vegetación VHI.

En los últimos años ha tenido un vertiginoso desarrollo la teledetección, técnica de obtención de información, desde los satélites artificiales, de lo que está ocurriendo en la superficie de la tierra o en la atmósfera, sin entrar en contacto con ellas, a través de imágenes tomadas por estos. Ellos incluyen índices o variables enfocadas a evaluar la sequía.

Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas NDVI

De Tucker, 1979

Permite estimar el desarrollo de una vegetación basándose en la medición, con sensores remotos, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la misma emite o refleja, lo que permite determinar el estrés hídrico experimentado por la vegetación. Utiliza los canales 1 (espectro visible VIS) y 2 (infrarrojo cercano NIR) del sensor AVHRR de los satélites de órbita polar NOAA (satélite NOAA-AVHRR). La banda visible informa acerca de la cantidad de energía absorbida por las plantas, mientras que la vegetación sana es altamente reflectante en el infrarrojo cercano, por lo que su diferencia muestra en cierta forma el grado de actividad fotosintética. Cuando una cobertura vegetal se encuentra en estrés hídrico, tiende a absorber menos radiación solar en el VIS aumentando su reflectancia, y absorbe más en el NIR. El índice de diferencia (ID) se calcula como la diferencia entre las bandas espectrales pertenecientes a los rangos infrarrojo cercano y visible (canales 2 y 1). Este tiende a decrecer cuando la cobertura vegetal está afectada por algún factor como falta de agua, enfermedades, plagas, etc. $ID = R2 - R1$. El índice de vegetación diferencial normalizado se define como: $NDVI = (R2 - R1)/(R2 + R1)$, que oscilan entre -1 y 1.

Índice de la Condición de la Vegetación VCI

De Kogan, 1990

Se calcula a partir de los valores del índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas NDVI, filtrados para reducir ruido. Donde se utilizan los valores mínimos y máximos del NDVI interanuales registrados del período analizado, valores bajos del VCI indican vegetación en malas condiciones; en estrés hídrico, por ejemplo.

Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas Estandarizadas (SVI)

De Peters, et al., 2002

Describe la probabilidad de la desviación de las condiciones de la vegetación a partir de la "normal" basada en cálculos de valores semanales. Los valores de Z de la distribución del NDVI son usados para estimar la probabilidad de ocurrencia de la condición actual de una localidad dada en relación a una condición de la vegetación histórica. El SVI puede ser interpretado como una condición de la vegetación basada en el hecho de que la vegetación es un eficiente integrador de los impactos climáticos y antropogénicos en la capa límite de la atmósfera. Además proporciona un indicador temporal continuo en un plazo corto de las condiciones climáticas.

Índice de Salud de la Vegetación VHI.

De Kogan 1997

Mide el grado de estrés de la vegetación a través de la radiancia observada. Es un indicador "proxy" de las condiciones de la salud general de la vegetación. Es una estimación combinada del estado de contenido térmico y de humedad de la vegetación. Se deriva de la unión del índice de Condición de la vegetación (Vegetation Condition Index, VC) y el índice de Condición de la temperatura (Temperature Condition Index, TC). Al igual que el NDVI, el VH se construye a partir de las imágenes satelitales. En los últimos años este índice ha sido utilizado exitosamente para la detección de la sequía en relación al estrés de la vegetación y la estimación de la pérdida de cultivos en los E.U.A.

Índice de Humedecimiento Modificado ó Índice de Disponibilidad Hídrica – IDH

Allen et al. 1998 y Solano et al, 2003 a partir del método FAO.

Su herramienta básica es el balance hídrico agro-meteorológico del suelo en la rizosfera, según el método empleado por la FAO, modificado por Allen R. et al. (1998) y simplificado y calibrados algunos cálculos de sus elementos principales, por Solano et al. (2003). Tal balance simplificado del suelo, expresado en términos del agotamiento de agua en la rizosfera (Arl) al final de un día, década, mes, etc., es planteado por Solano et al. como: $Ar = Ari - I - Pei - Ii + ETcai$

Ari-1 es el agotamiento de agua en la rizosfera al final del período temporal anterior de análisis (i - 1).

Pei es la precipitación efectiva en el período temporal de análisis (i).

Ii es la irrigación en el período temporal de análisis (i); en condiciones de secano este no se considera.

ETcai la evapotranspiración (necesidad hídrica) del cultivo, ajustada en el período temporal de análisis (i)

También utiliza otras expresiones como: $ETc = Kc \cdot ETo$; Kc- coeficiente de cultivo, ETo evapotranspiración de referencia (mm).

$ETCa = (Kc \cdot ETo) \cdot Ks$; Ks- coeficiente de estrés. Y $IDH = (TAD - Ar) \cdot TAD^{-1}$

IDH- índice de disponibilidad hídrica: representa la razón entre la reserva de agua del suelo en la década de análisis y el total de agua disponible por los cultivos; siendo (TAD - Ar) el contenido actual de agua en la rizosfera (mm) y TAD es el total de agua disponible en la rizosfera (mm). (Citado en Solano O. et al, 2005)

Índice de Sequía Agrícola ó Índice Nacional de Lluvia – RI

De Gommès y Petrassi, 1994.

Se calcula a partir de las precipitaciones anuales promedio de las estaciones con registro, individualmente para cada país, en este caso de África. Permite relacionar sus valores con la producción agrícola, al tomar valores pluviométricos anuales, por lo que guardan una relación matemática directa. No es un índice útil para identificar sequía meteorológica ni hidrológica, pero sí para sequía agrícola. No permite desarrollar una escala espacial detallada, toda vez que proporciona la obtención de valores globales a nivel de país o de grandes territorios (citado en Byun et al, 1999; Valiente, 2001; Zargar, 2011).

Índice de Sequía Agregado (The Aggregate Drought Index) - ADI

Keyantash and Dracup, 2004

Ha sido desarrollado y evaluado dentro de tres divisiones climáticas en California, USA. Considera todas las formas físicas de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola). A través de la selección de variables para cada tipo, el agua almacenada en cuerpos de agua y los datos hidroclimáticos para cada división hidroclimática. Se le aplica el análisis

de componentes principales, y el principal componente principal fue desestacionalizado para llegar a un valor simple de ADI para cada mes. El análisis de componentes principales es utilizado para obtener las señales hidrológicas dominantes de las correlaciones de los datos observados. El ADI es el primer componente principal normalizado por la desviación estándar de las series mensuales. Proporciona una clara y objetiva aproximación de descripción de la intensidad de la sequía, que puede ser rápidamente adaptada para caracterizar la sequía sobre una base operacional. Los variables de entrada representan volúmenes de agua que se mueven dentro de la división climática. Los seis parámetros adoptados para el ADI incluyen o son: Precipitación, evapotranspiración, corrientes de agua, almacenamiento en reservorios, contenido de humedad del suelo y almacenamiento de nieve. El ADI, como el PDSI también se sustenta en el principio del balance hidrológico. Sus ventajas incluyen el establecimiento de la sequía desde la perspectiva meteorológica, hidrológica y agrícola, y que su formulación matemática puede ser rápidamente aplicada a nuevos datos de observación en forma directa.

Índice de Sequía Oferta-Demanda – SDDI

De Rind et al., 1990

Es una variante modificada y simplificada del PDSI, ya que prescinde de valores de recarga hidrológica, escorrentía de las aguas y pérdida de humedad del suelo, siendo su ventaja esencial. Equivale a:

$Dsddi = P - Ep$; P- precipitación y Ep- evapotranspiración potencial. Desarrolla el cálculo acumulativo mensual para definir la evolución del período seco o húmedo. No permite la comparación de sus resultados entre una región y otra, lo que es su principal defecto. Distingue, como intervalos de sequía: sequía moderada, fuerte y extrema.

Índice de Suministro (aporte) de Agua Superficial SWSI

De Shafer y Dezman, 1982.

Es un índice de corte eminentemente hidrológico, diseñado para conocer las condiciones de humedad superficial, incluyendo la nieve acumulada. Requiere cuatro datos principalmente: la masa de nieve, el caudal de los ríos, la precipitación y el agua almacenada en los embalses. Es un complemento del Índice de Palmer que no está diseñado para grandes variaciones topográficas. Es más recomendado para zonas con áreas montañosas y escorrentía nival, pues es dependiente del agua de montaña. Se aplica en cuencas. Sus valores están estandarizados para permitir la comparación entre cuencas (citado en: Byun and Wilhite, 1999; Valiente, 2001; Mishra and Singh, 2010).

Índice Hidrológico de Sequía de Palmer – PHDI

De Palmer, 1965.

Nació a partir de introducir modificaciones al PDSI, por lo que tiene similitud con este. Las modificaciones están destinadas a detectar las anomalías de humedad que afectan el caudal de las corrientes superficiales, la disponibilidad de agua en el suelo y el nivel de agua en lagos o embalses. El PHDI evoluciona muy lentamente de un mes a otro, de tal forma que no es útil para detectar sequía meteorológica, ya que las reservas de agua no empiezan a resultar afectadas hasta que la sequía se haya prolongado en el tiempo. De igual forma, los valores del PHDI permanecen negativos meses después de que el PDSI retorne a valores próximos a cero, dado el tiempo necesario de recarga hídrica. No es propio para detectar sequía meteorológica, sino hidrológica. El PDSI y el PHDI utilizan los mismos valores de referencia para definir las situaciones de sequía.

Índice de Déficit de Humedad - SMDI

De Narasimhan y Srinivasan, 2005

Con base en mediciones realizadas del contenido de agua alrededor de las raíces de cultivos (maíz y trigo), a nivel semanal, durante un año, y tomando a la mediana como la normal de la disponibilidad del agua del suelo, para cada semana además de los valores máximos y mínimos del agua del suelo, se obtuvo el porcentaje de déficit de humedad del suelo. Con este valor se obtuvo el SMDI. Este fue calculado a cuatro niveles de profundidad del suelo, considerando que el cultivo potencial extrae agua desde diferentes profundidades, dependiendo de las diferentes etapas y del tipo de cultivo, a una resolución de 16 km². Utiliza el modelo hidrológico SWAT y se apoya en el uso de un GIS.

Índice de déficit conjunto – JDI

Kao y Govindaraju, 2010

Consiste en la unión de distribuciones de múltiples SPI usando funciones Cópula, método que consiste en el uso de funciones de distribución multivariadas que unen distribuciones de probabilidad conjuntas para sus distribuciones marginales unidimensionales. Este índice es capaz de contabilizar las distribuciones marginales de la precipitación y de las corrientes de agua, además de reflejar las sequías, tanto emergentes como prolongadas, de una manera temporal.

También permite establecer la sequía mes a mes, y determina la cantidad de precipitación requerida para alcanzar las condiciones normales en los meses siguientes.

En consonancia con los objetivos de este trabajo, la información individual expuesta acerca de los índices, incluida la descripción anterior, tiene como propósito dar una idea resumida de cada uno, del tipo de sequía que permite evaluar y una valoración crítica breve, ya que es elevado el volumen de material científico existente sobre cada uno de ellos. Para una consulta particular y profunda acerca de alguno, especialmente del procedimiento detallado sobre su aplicación, que queda fuera de los propósitos de este artículo, es imprescindible la consulta de la fuente (ver referencias).

Por otro lado, debe decirse, que en diferentes publicaciones se presentan valoraciones acerca de la efectividad y limitaciones del uso de algunos de los índices tratados, o análisis comparativos acerca de los resultados obtenidos con unos y otros, a partir de la experiencia de sus autores, que pueden ser consultados por los interesados, como complemento a la información que aquí se brinda.

Consideraciones finales

Como se recoge en el presente documento, existen en la actualidad más de cuarenta índices de sequía diferentes, que abarcan una gama amplia de variables y aspectos vinculados con este fenómeno, y que brindan utilidad cognitiva y aplicada muy diversas.

Los índices de sequía constituyen una herramienta poderosa para el desarrollo de los estudios científicos sobre este importantísimo fenómeno, y para su aplicación práctica en esferas vitales de la vida del hombre, de la economía y de la sociedad, frecuentemente impactada por el mismo. Pueden considerarse indicadores ambientales de estado, herramientas rápidas de diagnóstico, y medio de aviso para los sistemas de alerta temprana y para la toma de medida contra este tipo de fenómeno peligroso.

Los IS presentan diferentes posibilidades, ventajas de uso y nivel de eficacia, y a todos corresponde una utilidad particular concreta.

Lo anterior y la existencia de gran cantidad y variedad de estos índices, constituye una fortaleza y una oportunidad elevada en tal sentido, que facilita la incursión en esta importante esfera del conocimiento, y la aplicación de los mismos por parte de científicos, gestores ambientales e interesados en el tema; y sobre todo, permite escoger los índices apropiados en cada caso, acorde a los propósitos específicos y a la disponibilidad de datos existentes.

Dentro de los cuatro tipos de sequía reconocidos, se aprecia que el mayor desarrollo en los estudios, y particularmente en los índices vinculados con ellos, corresponde a la sequía meteorológica. Contrario sucede con la denominada sequía socio-económica, que resulta la más compleja y difícil de evaluar, motivo por lo cual es la menos desarrollada y prácticamente no existen índices acertados sobre este tipo de sequía. En virtud de lo anterior, en este trabajo no se abordaron estos.

Los otros dos tipos (sequía agrícola e hidrológica) presentan un buen nivel de desarrollo y constan de indicadores bien logrados de amplio uso en muchos países, si bien es menor la cantidad numérica y la extensión de estos, en comparación con los ISM. El avance tecnológico ocurrido en algunos campos en los últimos años, particularmente en la esfera digital y sus aplicaciones (a la hidrometría, la edafología y la agrotecnia, principalmente), ha permitido el nivel científico existente hoy en la hidrología y en la agricultura, especialmente el monitoreo automatizado de variables clave, lo que constituye un factor que ha impulsado y consolidado el empleo de índices diversos en esas áreas, dentro de ellos los IS. Incluso se encuentran en fase reciente de desarrollo algunos nuevos índices correspondientes a estos dos tipos de evaluación de sequía, no recogidos en la relación anterior, debido a que requieren de mayor consolidación a pesar de su importancia, como el índice de escurrimiento estandarizado, entre otros.

Toda vez que este trabajo brinda una panorámica de los diferentes índices que se utilizan en la actualidad para el estudio de la sequía, individualmente y por tipos, brinda orientación acerca del objetivo y la esencia particular de cada índice, acerca de sus formas de clasificación, y ofrece una valoración analítica del estado de desarrollo de los grupos

tipológicos; todo ello confiere al presente documento, además, valor de consulta, como material actualizado y crítico sobre el tema.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado a este trabajo, por el Instituto de Geografía de la UNAM, D.F., México, y la Facultad de Geografía de la Universidad de La Habana, Cuba. El mismo corresponde al proyecto de Intercambio Académico titulado “Caracterización y clasificación de la Sequía Meteorológica. Ejemplos de caso con sequía severa de México y Cuba”, financiado por la UNAM.

Se agradece así mismo, de modo particular, la colaboración del Ms. Cuauhtémoc J. Torres Ruata del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la elaboración del presente documento.

Referencias

- Bazrafshan J., Hejabi S., Rahimi J. 2014: Drought monitoring using the Multivariate Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management*. 28(4): 1045 – 1060.
- Bhalme, N. H. and Mooley, A. D. (1980). Large-Scale droughts/floods and Monsoon circulation. *Monthly Weather Review*. 108: 1197-1211.
- Byun, H-R. and Wilhite, A. D. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*. 12: 2747-2756).
- Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V. y Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 18 (1): 126-132.
- Dracup, J. A., Lee, K. S. and Paulson, E. G. Jr. 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*. 16(2): 297-302.
- García, E. y Hernández, M. E. 1989. Anomalías de la precipitación en la República Mexicana de 1921 a 1980. *Revista de Geografía. INEGI. México*. 2(3): 1-24.
- Garrido, R. 1999: A drought watch system for Southeast Spain. *Drought Network News*. 11(2):3-7. Visible en: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=droughtnetnews>
- Gibbs, W. J. y Maher, J. V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin* 48. Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Gutiérrez Hernández, J.E.; T. López; J.C. Hernández 2007: Utilización de dos índices para evaluar la sequía meteorológica, y su aplicación en áreas de interés de Cuba: Índice Global de Sequía Anual e Índice de Persistencia de la Sequía. *Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial*. Editorial DESOFT. La Habana, 2007. ISBN: 978-959-282-059-3
- Heim, R.R., (2002): A review of twentieth-century drought indices used in USA. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1149-1165.
- Hare, K. F. and A. L. Ogallo. 1993: *Climate variation, drought and desertification*. WMO. No. 653. Geneva. WMO.
- Hernández Cerda, M.E.; G. Carrasco Anaya y G. Alfaro Sanchez 2007: Mitos y realidades de la sequía en México. Libro “Temas Selectos de Geografía de México”. Instituto de Geografía, UNAM. ISBN: UNAM 978-970-32-4692-2
- Kao, S-Ch. and Govindaraju, R.S. 2010: A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*. 380: 121-134.
- Karl, R. T., 1986: The sensitivity of the Palmer Drought severity index and Palmer’s Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 25: 77-86.
- Keetch, J. J. and Byram, G. M. 1968: A drought index for forest fire control. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC. 32pp. http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp_se038.pdf. Acceso diciembre 2015.
- Keyantash, A. J. and Dracup, A. J. 2004: An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*. 40(9): W09304, doi:10.1029/2003WR002610.
- Kogan, F. N. 1990: Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. 11(8): 1405-1419.

- Kogan, F. N. 1997: Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78: 621-636.
- Lakshmi, K. V. T., Barbosa, H., Koteswara, R. K. and Prabha, J. E. 2012: Some studies on the frequency of extreme weather events over India. *Journal Agricultural Science and Technology*. 14(6):1343-1356.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993: *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference in Applied Climatology, Anaheim, Calif. 17-22 January 1993. American Meteorological Society.
- Meshcherskaya, V.A. and Blazhevich, G.V. 1997: The drought and excessive moisture indices in a historical perspective in the principal grain-producing regions of the Former Soviet Union. *Journal of Climate*. 10: 2670-2682.
- Meyer, J. S., Hubbard, G. K. and Wilhite, A. D. 1993: A Crop-Specific Index for Corn: I. Model development and validation. *Agronomy Journal*. 85: 388-395.
- Mishra, A.K. and V.P. Singh (2010): A Review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. 391: 202-216.
- Morales, S. J. A. 2005: El efecto de la longitud de registro en el cálculo del índice de precipitación estándar. Tesis de Maestría en Ingeniería (Hidráulica). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 111pp.
- Narasimhan, B. and Srinivasan, R. 2005: Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*. 133:69-88.
- Niemeyer, S. 2008: New drought indices. *Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens*, 80: 267-274.
- Palmer, W. C. 1965: Meteorological drought. Weather Bureau Research Paper No. 5, U. S. Department of Commerce, Washington, DC. 58pp.
- Palmer, W. C. 1968: Keeping track of moisture conditions nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise*. 21:156-161.
- Peters, A. L., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., and Svoboda, M. D. 2002: Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 68: 71-75.
- Pita, L. M. L. 2001: Sequías en la cuenca del Guadalquivir. En: Gil O.A. y Morales, G. A. (Editores). *Causas y consecuencias de las sequías en España. Caja de Ahorros del Mediterráneo*. Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante. 303-343.
- Quintana, V. y Álvarez, A. O. E. 2005: Análisis del Índice de Repetibilidad (IR) de la sequía en el período 1981-2000 en la provincia Granma. *Revista Electrónica Granma Ciencia*. Vol.9 (1): 6pp. ISSN 1027-975X Visible en: http://www.grciencia.gramma.inf.cu/vol9/1/2005_09_n1.a2.pdf. Acceso diciembre 2015
- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C. and Ruedy, R., 1990: Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. *Journal of Geophysical Research*. 95(D7): 9983-10,004.
- Solano O. et al. 2005: Evaluación de la Sequía Agrícola en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*. Instituto de Meteorología. Vol 12. No. 2. La Habana. Pp. 3-14.
- Tinajero, G. J., L. A. Huesca, V. V. Martínez, R. J. Morelos, H. J. Ruíz, M. F. Escalante y M. E. Díaz. 1986: Análisis en la sequía en México en el periodo 1976-1980. México. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Tucker, C. 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8: 127-150.
- Valiente, O. M. 2001: Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*. no.26: 59-80.
- Vicente -Serrano, M. S., Beguería, S. and López-Moreno, I. J. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*. 23 (7): 1696-1718.
- Vázquez Montenegro, R. J. y Solano Ojeda, O. J. 2013. Determinación del peligro por sequía agrícola. *Revista Cubana de Meteorología*, Cuba. Vol. 19, No. 2: 154 - 168.
- Weghorst, K.M., 1996. The Reclamation Drought Index: Guidelines and Practical Applications, Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA. (Available from Bureau of Reclamation, D-8530, Box 25007, Lakewood, CO 80226).
- Wells, N. and Goddard, S. 2004: A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*. 17(12): 2335-2351.

Wilhite, D.A. y Glantz, M.H. 1985: Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, vol. 10. Pp. 111-120

Zargar, A., Sadiq, R., Nasser, B. and Khan, I. F. 2011: A review of drought indices. *Environ. Rev.* 19: 333-349.

Acerca de los autores:

José Evelio Gutiérrez-Hernández: Doctor en Ciencias Geográficas, Profesor Titular y Vicedecano de la Facultad de Geografía, Universidad de La Habana. Autor de siete libros y de treinta artículos científicos. Ha dictado cursos de posgrado y conferencias en doce universidades, sobre Hidrología, recursos hídricos, manejo de cuencas y problemas sociales del agua. Ha participado en veinte proyectos de investigación, en Cuba, México, Brasil, Alemania y España. Tiene dos premios UH en medioambiente. Tutor de catorce tesis de Maestría y Doctorado de estudiantes de Cuba, Ecuador, México, Venezuela y Zimbabwe. Miembro del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas, del Tribunal de Doctorado y del CONAPHI de Cuba.

María Engracia Hernández-Cerda: Doctora en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), investigadora Asociada del Instituto de Geografía de la UNAM, en el área de Climatología. Profesora de asignatura en la Facultad de Ciencias de la misma Institución. Publicación de artículos en revistas internacionales y nacionales, libros, capítulos de libros, más de un centenar de mapas y artículos “in extenso”. Participación en actividades de evaluación de proyectos y de manuscritos Dirección de más de una decena de tesis de licenciatura y maestría. Participación en proyectos de investigación con la Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España y Universidad de La Habana, Cuba.