

Asociación entre algunos índices de sequía e impactos socio-productivos en el Pacífico Norte de Costa Rica

Association between some Drought Indices and Socio-productive Impacts in the Northern Pacific Region of Costa Rica

Luis Eduardo Quesada-Hernández¹, Hugo G. Hidalgo², Eric J. Alfaro³

[Recibido: 19 de agosto 2019, Aceptado: 18 de octubre 2019, Corregido: 30 de octubre 2019, Publicado: 1 de enero 2020]

Resumen

[**Introducción**]: Las sequías en Costa Rica son un evento hidrometeorológico extremo que afecta a muchos productores agrícolas y a la sociedad en general. [**Objetivo**]: Identificar cuál índice de sequía logra una relación más fuerte con los impactos asociados a este tipo de acontecimientos extremos en sectores sociales y productivos para tres cantones localizados en Guanacaste, provincia de Costa Rica, ubicada dentro del Corredor Seco Centroamericano (CSC). [**Metodología**]: Para ello se construyó (e integró) una base de datos de impactos producidos por sequías para el periodo 1970-1999, a partir de diferentes fuentes de información, que incluye Desinventar, EM-DAT, el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, así como reportes periodísticos de impactos de otras fuentes. Estos datos se compararon con los siguientes 6 índices mediante una regresión logística: el Índice Normalizado de Precipitación a escalas de 6 y 12 meses (conocidos como SPI 6 y SPI 12 respectivamente), el Índice de Severidad de Sequía y el Índice Hidrológico de Palmer (conocidos como PDSI y PHDI, respectivamente), el Índice de Reconocimiento de Sequía (conocido como RDI) y el Índice Modificado de Anomalía de Lluvia (conocido como mRAI), todos previamente aplicados en América Central. [**Resultados**]: En general, el índice más apropiado para estudiar la sequía asociada con los impactos sociales y productivos es el SPI para 6 y 12 meses. [**Conclusiones**]: En todos los cantones estudiados este índice presenta un alta (baja) probabilidad de muchos (pocos) impactos cuando se encuentra en condiciones moderada y severamente secas (húmedas).

Palabras clave: América Central; Corredor Seco Centroamericano (CSC); sequía; variabilidad climática.

Abstract

[**Introduction**]: The droughts in Costa Rica are an extreme hydrometeorological event that affects many crop producers and society in general. [**Objective**]: To define which drought index shows the strongest relationship with drought impacts reports in social and productive sectors for three areas in Guanacaste, province of Costa Rica located within the Central American Dry Corridor (CSC). [**Methodology**]: A drought impact database for the period 1970-1999 was created from different sources of information: Desinventar database, EM-DAT, information from the National Meteorological Institute of Costa Rica, and different press reports. This database is compared to the following six drought indexes using the logistic regression technique: the Standardized Precipitation Index at scales of 6 and 12 months (SPI 6 and SPI 12 respectively), the Drought Severity Index and the Hydrological Index of

- 1 Investigador en el Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica, Costa Rica. luis.quesadahernandez@ucr.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0001-7322-4820>
- 2 Director del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y profesor catedrático en la Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. hugo.hidalgo@ucr.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0003-4638-0742>
- 3 Investigador del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CI-MAR) y profesor catedrático en la Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. erick.alfaro@ucr.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0001-9278-5017>





Palmer (PDSI and PHDI respectively), the Drought Recognition Index (RDI), and the Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI). [Results]: In general, the most appropriate index to link drought and social and productive impact reports is the SPI for 6 and 12 months. [Conclusions]: In all the areas of study, this index has a high (low) probability of many (zero) impacts when it is in moderately and severely dry (wet) conditions.

Keywords: Central America; climate variability; drought; Dry Corridor.

1. Introducción

De forma general, se entiende una sequía como una reducción en la cantidad de agua disponible en un área geográfica de tamaño variable, durante un periodo de tiempo determinado (Rossi, 2000, Tsakiris & Vangelis, 2005). Este es un evento hidrometeorológico extremo que puede ocurrir en prácticamente cualquier tipo de clima existente, que afecta sin distinción a países desarrollados o en desarrollo (Mishra & Singh, 2010; Wilhite & Glantz, 1985).

Dentro de las áreas en el nivel mundial donde la sequía es recurrente, se encuentra el Corredor Seco Centroamericano (CSC), el cual es una franja con una alta incidencia de sequías (Gotlieb et al., 2019). El CSC se extiende a lo largo de la vertiente del Pacífico de Centroamérica, desde Chiapas, México hasta Guanacaste en Costa Rica e incluye el Arco Seco de Panamá (CCAD, 2011; Gotlieb et al., 2019). El CSC cambia su tamaño de acuerdo con distintos fenómenos de variabilidad climática, pudiendo aumentar o disminuir durante años, El Niño o La Niña, por ejemplo (Quesada-Hernández et al., 2019). El origen y mecanismos físicos que controlan el clima del CSC pueden ser consultados en diferentes investigaciones (Calvo-Solano et al., 2018; Hidalgo et al., 2015; 2019).

La sequía es uno de los eventos hidrometeorológicos que más daños provoca en sectores como la agricultura y el ambiente. Sumado a lo anterior el incremento de la población conlleva una mayor demanda de recurso hídrico para satisfacer las diferentes actividades que se realizan a diario (Mishra & Singh, 2010; Vicente-Serrano et al., 2010).

Lo anterior es muy preocupante en el área rural del trópico seco, donde habitan 10.5 millones de personas, 60 % viven en situaciones de pobreza y desfavorables, con poco acceso a los servicios de salud y una actividad económica ligada a la agricultura en sitios con suelos pobres, alta pendiente y poca tecnología, para mejorar las condiciones de producción (Gotlieb et al., 2019; van der Zee et al., 2012a; 2012b).

Es por ello que el estudio de la sequía ha llamado la atención de muchos profesionales en distintas áreas; sin embargo, este fenómeno resulta muy complejo de estudiar ya que definir aspectos como su inicio, duración, área afectada, intensidad y su final no es una tarea fácil (Qui-ring, 2009; Steinemann et al., 2015). Su severidad muchas veces no solo depende de la duración del evento. La época del año, la demanda del recurso hídrico y la vulnerabilidad por parte de las actividades humanas puede determinar si esta tiene un alto o bajo impacto, es por ello que estos eventos no se deben de separar de su contexto social (Wilhite & Glantz, 1985). Su forma más común de estudio es mediante índices, los cuales se enfocan en analizar utilizando distintas variables como precipitación, temperatura, evapotranspiración y humedad del suelo, para las



condiciones actuales de un lugar. La mayoría de estos índices puede oscilar entre condiciones húmedas, normales o secas que dependen de las variables utilizadas para medir las condiciones de sequía (leve, moderada, severa y extrema).

Identificar cual índice utilizar en un lugar específico es una tarea compleja de realizar. La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) junto con la Asociación Mundial por el Agua (GWP, por sus siglas en inglés) sugieren una serie de elementos que todo índice o conjunto de estos debe de cumplir antes de definir si se puede utilizar o no. Entre ellos están: la disponibilidad de datos, la capacidad computacional, su complejidad, la aplicabilidad al área de estudio y la capacidad de responder ante los impactos que se están presentando en un lugar o una región determinada (WMO & GWP, 2016).

En investigaciones en las que se evalúan diferentes índices de sequía (Adnan *et al.*, 2017; Bayissa *et al.*, 2018; Vicente-Serrano *et al.*, 2010) se pone especial énfasis en las capacidades estadísticas como la robustez o la consistencia para reproducir eventos históricos desde una perspectiva física, pero se deja de lado aspectos asociados a los impactos. Esto podría limitar los análisis de la sequía, ya que un índice podría estar identificando niveles de sequía bajos (altos) cuando hay muchos (pocos) impactos asociados a un evento.

Por lo anterior, esta investigación se centra en evaluar diferentes índices de sequía desde una perspectiva de impactos en diferentes sectores productivos y sociales en el CSC, específicamente en Guanacaste, provincia de Costa Rica. Con ello se lograría identificar cual índice reproduce la sequía desde un enfoque multidisciplinario, al abarcar tanto aspectos físicos como sociales.

2. Metodología

2.1 Datos

Los datos utilizados para calcular los índices de sequía se obtienen de la base de datos NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica. Estos datos proceden de las estaciones de los servicios meteorológicos e hidrológicos de la región, que cuenta con 199 estaciones ubicadas a lo largo de América Central. Los datos de precipitación y temperatura se recopilan mensualmente para el periodo 1970-1999. Las estaciones que se utilizan, en específico, para este trabajo son las ubicadas en el cantón de Liberia (85.54°W y 10.6°N), Santa Cruz (85.58°W y 10.26°N) y para el caso de Abangares al no haber alguna estación en este cantón en la base de datos, se utilizó la que estuviera geográficamente más cerca, la cual se encuentra en Puntarenas (84.83°W y 10.13°N). En resumen, los datos de los cantones fueron obtenidos de la estación que estuviera dentro o más cercana a cada municipio. Todas las estaciones consideradas se encuentran en el Pacífico Norte de Costa Rica, dentro del área del CSC.

Para calcular los índices de Palmer (Palmer, 1965) se requiere información de capacidad de campo del suelo, esta se recopila de la base de datos *Global Soil Texture and Derived Water holding Capacities*, la cual tiene una resolución espacial de 1° x 1° (Webb *et al.*, 2000). La



información de capacidad de campo fue interpolada para las estaciones antes mencionadas al utilizar una interpolación “natural” de MATLAB basada en la triangulación Delaunay (Delaunay, 1934; Barber *et al.*, 1996). Sumado a lo anterior, los índices de Palmer fueron calculados mediante la evapotranspiración, según la metodología de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Respecto a los impactos asociados a la sequía, se utiliza la base de datos empleada por Alfaro *et al.* (2018b; c) y Pérez-Briceño *et al.* (2016). Estas contienen información de tres distintas fuentes: DesInventar (<http://www.desinventar.or>), EM-DAT (<http://www.emdat.be>) y el Instituto Meteorológico Nacional (<http://imn.ac.cr/>). Adicionalmente, se recopilaron noticias de diferentes periódicos nacionales en formato físico y digital para crear una base de datos única de estas cuatro fuentes distintas.

Cabe resaltar, que estas bases de datos contienen información de diferentes eventos hidrometeorológicos (frentes fríos, bajas presiones, huracanes, sequías), distintos tipos de impactos (por ejemplo: inundaciones, pérdidas agrícolas, daño en infraestructura, etc.) así como distintas escalas espaciales (regiones, provincias o departamentos, cantones o gobiernos locales y distritos) por lo que se filtró la información de forma tal que solo se seleccionaron impactos de sequías (pérdidas en la agricultura, racionamiento de agua o muerte de ganado) a una escala cantonal (municipal, gobierno local) para el periodo 1970-1999, el cual coincide con los datos de precipitación, temperatura y capacidad de campo del suelo.

De la base de datos creada, se filtra nuevamente para identificar los cantones que contienen la mayor cantidad de impactos reportados por el efecto de la sequía. Estos son: Liberia, Santa Cruz y Abangares, todos se encuentran en Guanacaste, provincia en el noroeste de Costa Rica.

2.2 Proceso metodológico

Se utilizan los mismos índices de sequía empleados en Quesada-Hernández *et al.* (2019), los cuales fueron seleccionados bajo distintos criterios: aplicabilidad en el área de estudio, disponibilidad de datos, facilidad de cómputo, así como algunos de los índices recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2012) para investigaciones de esta naturaleza.

Los índices de sequía utilizados fueron los siguientes: Índice Normalizado de Sequía, conocido en inglés como *Standardized Precipitation Index (SPI)* (Mckee, 1993) para 6 meses y 12 meses específicamente, para los meses octubre y diciembre, lo cual describiría eventos anuales y durante la época lluviosa de la vertiente del Pacífico de Costa Rica (mayo-octubre, Alfaro *et al.*, 2018a), el Índice Modificado de Anomalía de Lluvia conocido en inglés como *Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI)* (Hänsel *et al.*, 2016), el Índice de Severidad de Sequía y el Índice Hidrológico de Palmer, conocidos en inglés como *Palmer Drought Severity Index (PDSI)* (Palmer, 1965) y *Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)* respectivamente y usados para periodos de sequía extensos (Dai, 2011), el Índice Z de Sequía de Palmer, conocido como *Palmer Drought Z-Index*, utilizado para sequías agrícolas (Zargar *et al.*, 2011) y el Índice de Reconocimiento de Sequías, conocido como *Reconnaissance Drought Index (RDI)* (Tsakiris & Vangelis, 2005). A excepción del SPI, todos los índices fueron calculados mensualmente para cada una de las



estaciones y después se calcula la media anual para cada uno de ellos. El SPI fue calculado en forma mensual, pero para identificar, por ejemplo, la sequía anual, se utilizó el valor de SPI 12 del mes de diciembre de cada año, que representa las variaciones de precipitación de los 12 meses anteriores. Para identificar la sequía estacional, el SPI 6 se usó el valor en octubre de cada año, que representa las condiciones durante la estación lluviosa.

Cabe resaltar que cada uno de estos índices analizan diferentes tipos de sequía: mRAI, RDI y PDSI se enfocan en meteorológicas, Z y SPI para 6 meses reconocen impactos por agrícolas, mientras que SPI 12 y PHDI lo hacen para hidrológicas.

Los valores que se obtienen de los índices, para todo el análisis posterior, se clasifican como se observa en el **Cuadro 1**. De esta forma, para todos los índices habrá una sequía leve a partir de -0.5. La clasificación utilizada para los de Palmer se modifica con respecto a su forma original, para que todos los valores superiores (inferiores) a 3 (-3) se agrupen en la categoría de extremadamente húmedo (seco), esto comparando con la clasificación propuesta por [Alley \(1984\)](#) donde existe una categoría extra para valores superiores (inferiores) a 4 (-4).

Cuadro 1. Clasificación utilizada para evaluar los diferentes índices de sequía

Table 1. Classification used to evaluate the different drought indices

Categoría	SPI, RDI, mRAI	PDSI, PHDI e índice Z
Extremadamente húmedo	>=2	>=3
Severamente húmedo	1.5 a 1.99	2 a 3
Moderadamente húmedo	1 a 1.49	1 a 1.99
Levemente húmedo	0.5 a 0.99	0.5 a 0.99
Normal	0.49 a -0.49	0.49 a -0.49
Levemente seco	-0.5 a -0.99	-0.5 a -0.99
Moderadamente seco	-1 a -1.49	-1 a -1.99
Severamente seco	-1.5 a -1.99	-2 a -3
Extremadamente seco	<=-2	<=-3

Para comparar los impactos con los índices, estos fueron divididos en dos grupos: hay impacto por sequía (A) o no lo hay (B). Las dos categorías antes mencionadas fueron comparadas mediante el método estadístico de regresiones logísticas ([Wilks, 2011](#)) al seguir un análisis similar al empleado en [Alfaro \(2014\)](#) y [Alfaro & Hidalgo \(2017\)](#). Mediante la **Ecuación 1** se hacen los diferentes cálculos de las regresiones,

$$y(x) = \frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1)}} \quad (E.1)$$



De esta ecuación se tiene una unidad escalar x (cualquier índice de sequía) con una unidad y de categoría A o B. Al hacer estas regresiones se obtendrán dos curvas distintas con probabilidades de que el índice pueda detectar alguna de las dos condiciones antes mencionadas. Los diferentes análisis se llevaron a cabo en el programa Rstudio que utiliza la función glm (*Generalized Linear Models*) en su versión binomial (logit).

Se espera que el índice ideal para estudiar sequías y tomar decisiones en torno a este, sea aquel que tiene una alta probabilidad de identificar impactos cuando el índice se encuentre en una fase de sequía de acuerdo con el **Cuadro 1**.

3. Resultados y discusión

3.1 Distribución temporal de los impactos reportados

Al analizar la distribución espacial de los impactos en las áreas de estudio (**Figura 1**), se reconoce que muchos de estos están ligados al efecto de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), este es el caso de los años 1972-1973, 1982-1983 y 1997-1998, en donde el ENOS presentaba una intensidad especialmente fuerte (Wolter & Timlin, 1998). Se observa además casos en los que hay cantones mucho más sensibles ante la sequía, como por ejemplo Abangares en el año 1972 o Santa Cruz en 1998; sin embargo, en otras ocasiones el impacto parece ser general en todo Guanacaste.

Contrario a lo anterior, existen años en los que no se detectan impactos por sequías, esto se debe a periodos con condiciones neutras, más húmedas de lo normal o bajo el efecto de la Niña: 1970-1971 o 1974-1975 (**Figura 1**).

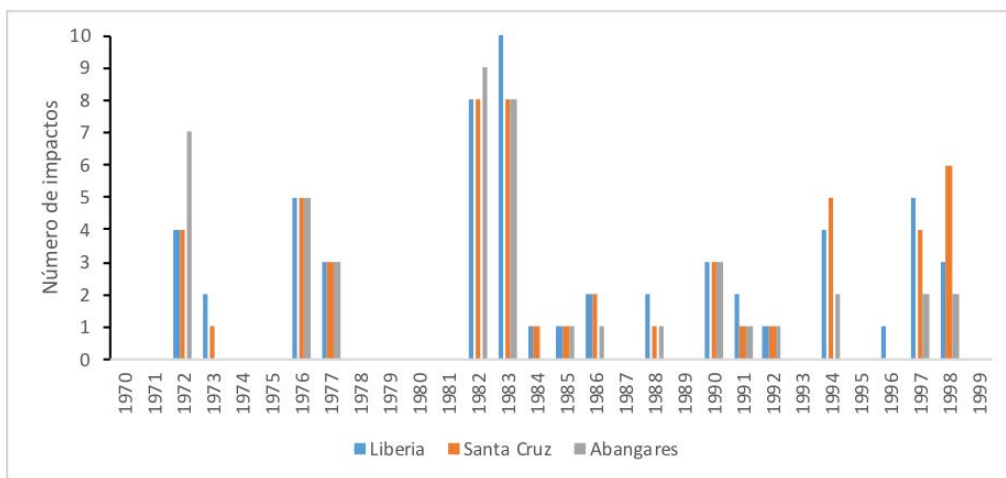


Figura 1. Distribución de los impactos socio-productivos en el periodo 1970-1999.

Figure 1. Distribution of socio-productive impacts in the period 1970-1999.



Los tipos de impacto son variados; sin embargo, los sectores más afectados siempre son la agricultura y la ganadería: pérdida de cosechas principalmente en granos básicos (arroz, frijoles y maíz), muerte de ganado asociado a falta de pasturas o falta de agua. Más información sobre impactos agrícolas por sequías se puede encontrar en Calvo *et al.* (2018). A estos impactos se le debe de sumar todos los asociados al consumo de recurso hídrico para las diferentes actividades realizadas por la población, en especial los racionamientos o faltantes del recurso durante varios días. Cabe mencionar que originalmente se pretendía hacer un análisis diferenciado para cada uno de los impactos que se estaban reportando; sin embargo, en las bases de datos consultadas no siempre aparecía el sector que fue afectado o el tipo de impacto. Por ello se tuvo que hacer un análisis mucho más general, para analizar impactos más específicos recomendamos la publicación de Calvo *et al.* (2018) o Pérez-Briceño *et al.* (2016).

3.2 Comportamiento de los índices de sequía utilizados

Se encuentra que todos los índices reaccionan de forma distinta, depende del lugar que se esté analizando (Figura 2). Esto se puede deber a diferentes factores, por ejemplo: la metodología con la que se calcula cada uno de los índices, datos de entrada, el tipo de sequía que tratan de reconocer (meteorológica, agrícola o hidrológica) o bien las condiciones físicas de cada uno de los lugares.

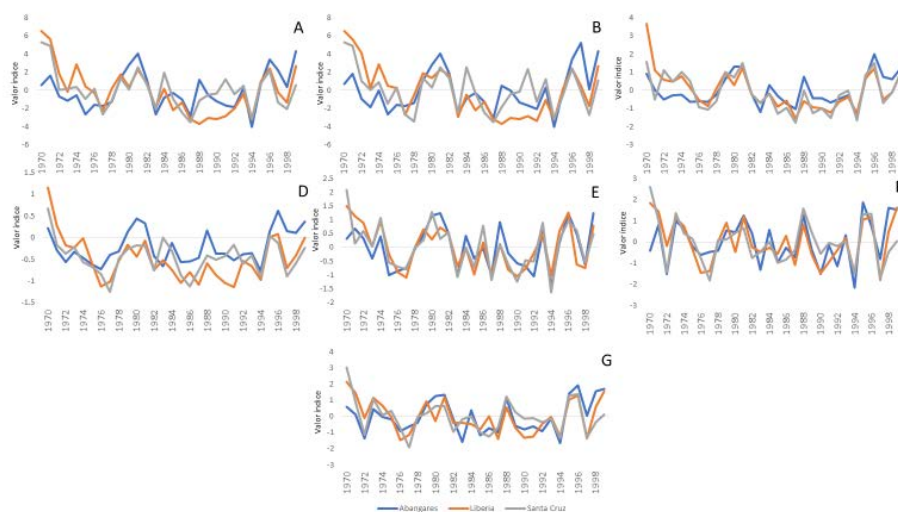


Figura 2. Series de tiempo de los índices de sequía utilizados en el estudio para: (A) PDSI, (B) PHDI, (C) índice Z, (D) mRAI, (E) RDI, (F) SPI 6 y (G) SPI 12. En color azul se encuentran los valores para Abangares, naranja Liberia y gris Santa Cruz.

Figure 2. Time series of drought indices used in the study for: (A) PDSI, (B) PHDI, (C) Z index, (D) mRAI, (E) RDI, (F) SPI 6 and (G) SPI 12. The blue values are for Abangares, orange for Liberia, and gray for Santa Cruz.



De forma general, los índices identifican condiciones de sequía cuando se espera que esto ocurra. Por ejemplo, en años de ENOS cálido fuerte 1972-1973, 1982-1983 y 1997-1998, la mayoría de los índices marcan sequía de leve a severa, en los tres lugares de estudio (**Figura 2**).

Sin embargo, también se observan diferencias de un lugar a otro que dependen del índice que se esté utilizando, este es el caso del PDSI y PHDI para Liberia, donde los índices marcan sequía moderada a extrema durante el periodo 1987-1992, mientras que para Santa Cruz esto solo ocurre durante los años 1987-1988 (**Figura 2**). Cabe mencionar que puede haber otros factores que afecten la identificación de estos eventos, como por ejemplo la distribución del relieve o la estación meteorológica que se esté utilizando para el cálculo de los índices.

Mencionar también que hay índices con un comportamiento bastante similar, este es el caso del SPI para escalas de 6 meses con el de 12 meses, donde los cambios entre ellos son muy pequeños. Lo anterior también ocurre para los índices PDSI y PHDI.

3.3 Relación entre los índices de sequía y los impactos

Al utilizar la metodología de modelos logit para comparar los impactos con los diferentes índices de sequía, se obtuvo el **Cuadro 2**. En él se observan los coeficientes utilizados para calcular cada uno de los modelos para el escenario en el que se reporte un impacto asociado a las sequías.

Cuadro 2. Coeficientes de los modelos logit ajustados para cada uno de los cantones analizados. En negrita se muestran los valores significativos al 95 % de confianza

Table 2. Coefficients of the adjusted logit models for each of the counties analyzed. Bold shows significant values at 95% confidence

Índice	Abangares			
	β_0	β_1	Z_0	Z_1
SPI6	-0.1766	-1.2407*	-0.416	-2.459*
SPI12	-0.2329	-1.282*	-0.536	-2.474*
RDI	-0.1655	-1.3461*	-0.403	-2.283*
mRAI	-0.7969	-2.6963*	-1.485	-2.17*
PDSI	-0.2006	-0.3881	-0.508	-1.787
PHDI	-0.1656	-0.2626	-0.433	-1.434
Índice Z	-0.1992	-1.2482*	-0.486	-2.114*
Índice	Liberia			
	β_0	β_1	Z_0	Z_1
SPI6	0.3209	-1.0099*	0.777	-2.236*
SPI12	0.3043	-0.9995*	0.739	-2.241*
RDI	0.3245	-1.2885*	0.786	-2.247*
mRAI	-0.9126	-2.412*	-1.345	-2.239*





PDSI	0.2505	-0.4893*	0.594	-2.315*
PHDI	0.2647	-0.3505*	0.653	-2.11*
Índice Z	0.2571	-1.2144*	0.617	-2.22*
Santa Cruz				
Índice	β_0	β_1	Z_0	Z_1
SPI6	0.1275	-1.6224*	0.288	-2.516*
SPI12	0.101	-1.6923*	0.228	-2.507*
RDI	0.1738	-1.7304*	0.397	-2.664**
mRAI	-1.183	-2.964*	-1.62	-2.13*
PDSI	0.1265	-0.5059*	0.315	-1.999*
PHDI	0.1524	-0.2897	0.397	-1.581*
Índice Z	0.04937	-1.65075*	0.111	-2.589**

Los valores z representan el resultado de la división entre el coeficiente obtenido (β) y su error estándar. Valores en negrita y con * representan significancias superiores a 0.95 y con ** significancias superiores a 0.99.

Del cuadro anterior se reconoce que la mayoría de los índices presenta una significancia estadística superior a 0.95 en al menos uno de los parámetros (Z_0 o Z_1). Cabe resaltar el caso de Santa Cruz, en el que se observan dos de ellos (RDI y Z) con significancias superiores a 0.99, siendo este el único cantón donde esto ocurre.

Aquellos índices en los que hay significancias inferiores a 0.95, en al menos uno de los cantones, fueron eliminados. Es por esta razón que el índice PDSI y PHDI no se tomaron en cuenta para los diferentes análisis realizados a continuación.



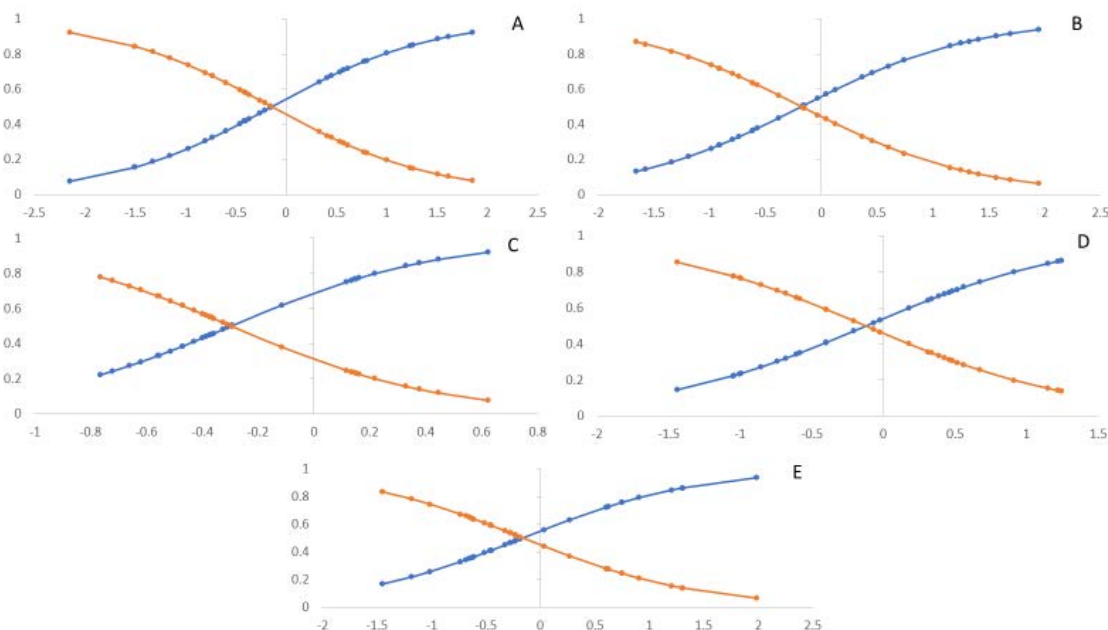


Figura 3. Regresiones logísticas entre los índices de sequía y los impactos reportados en Abangares para el periodo 1970-1999; en el eje y se muestra la probabilidad y en el eje x los valores del índice: A) SPI para 6 meses, B) SPI para 12 meses, C) mRAI, D) RDI y E) índice Z. La línea azul representa la probabilidad de los casos en los que no hay impactos, la línea naranja las probabilidades para 1 o más impactos.

Figure 3. Logistic regressions between drought indices and the impacts reported in Abangares for the period 1970-1999. The y-axis shows the probability and on the x-axis the values of the index: A) SPI for 6 months, B) SPI for 12 months, C) mRAI, D) RDI and E) Z index. The blue line represents the probability of cases in which there are no impacts, the orange line the probabilities for 1 or more impacts.

Al analizar las curvas obtenidas de los modelos logit (**Figura 3, 4 y 5**) se aprecia que, independientemente del cantón que se esté analizando, los índices logran describir de forma apropiada la falta de impactos, es decir, hay una alta probabilidad de que no haya impactos cuando los índices se encuentran en una fase positiva (exceso de humedad).

En la mayoría de los casos, esta probabilidad es superior a 80 %; sin embargo, algunos alcanzan probabilidades superiores al 90 % como por ejemplo el SPI para 6 y 12 meses en el cantón de Santa Cruz (**Figura 5**) o el mRAI y Z para Liberia (**Figura 4**).



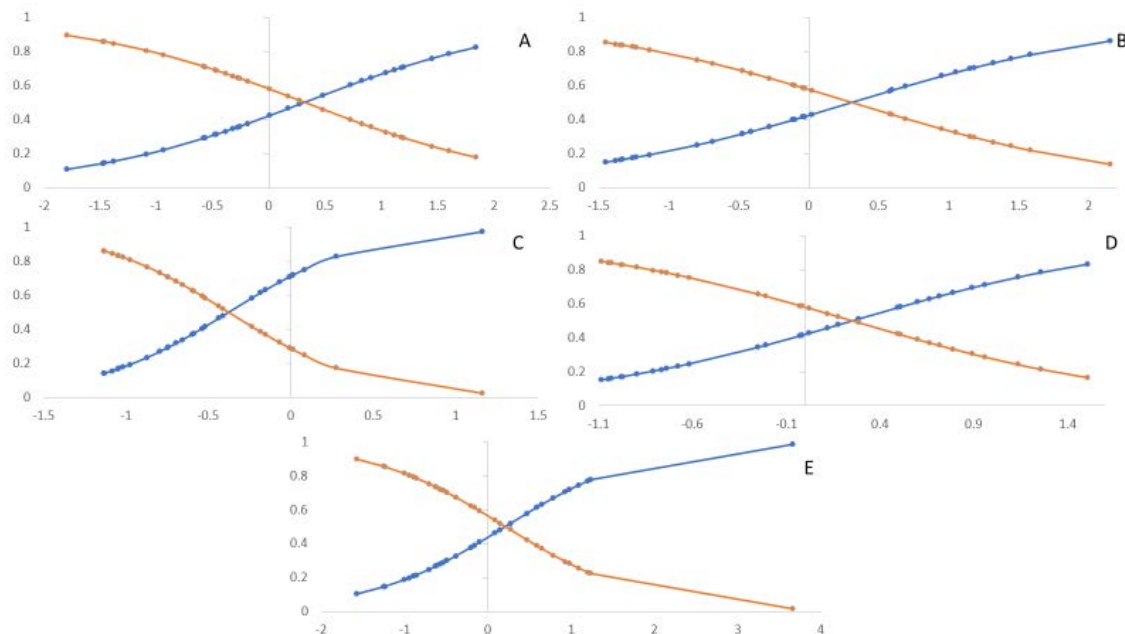


Figura 4. Regresiones logísticas entre los índices de sequía y los impactos reportados en Liberia para el periodo 1970-1999; en el eje y se muestra la probabilidad y en el eje x los valores del índice: A) SPI para 6 meses, B) SPI para 12 meses, C) mRAI, D) RDI y E) índice Z. La línea azul representa la probabilidad de los casos en los que no hay impactos, la línea naranja las probabilidades para 1 o más impactos.

Figure 4. Logistic regressions between drought indices and the impacts reported in Liberia for the period 1970-1999. The y-axis shows the probability and on the x-axis the values of the index: A) SPI for 6 months, B) SPI for 12 months, C) mRAI, D) RDI and E) Z index. The blue line represents the probability of cases in which there are no impacts, the orange line the probabilities for 1 or more impacts.

Conforme los índices se acercan a la condición normal (-0.49 a 0.49) las probabilidades de que haya un impacto empiezan a incrementarse. Para la mayoría de los casos la probabilidad de impacto se encontrará entre un 20 % y 60 %, en algunos casos estas probabilidades son aún mayores, por ejemplo, el Z para Santa Cruz (**Figura 5**) muestra valores superiores al 70 %, convirtiéndolo en un índice muy sensible ante los impactos. Nótese que entre más a la izquierda se encuentre el valor de la categoría normal (valor negativo), la probabilidad de impactos durante esta fase es mayor. Dentro de esta categoría, distintos índices pueden estar identificando diferentes tipos de impacto en sectores más sensibles, como por ejemplo la agricultura, la cual se puede ver afectada con variaciones leves en la precipitación durante épocas de siembra o cosecha, de ahí viene la alta sensibilidad del índice Z para Santa Cruz y Liberia.



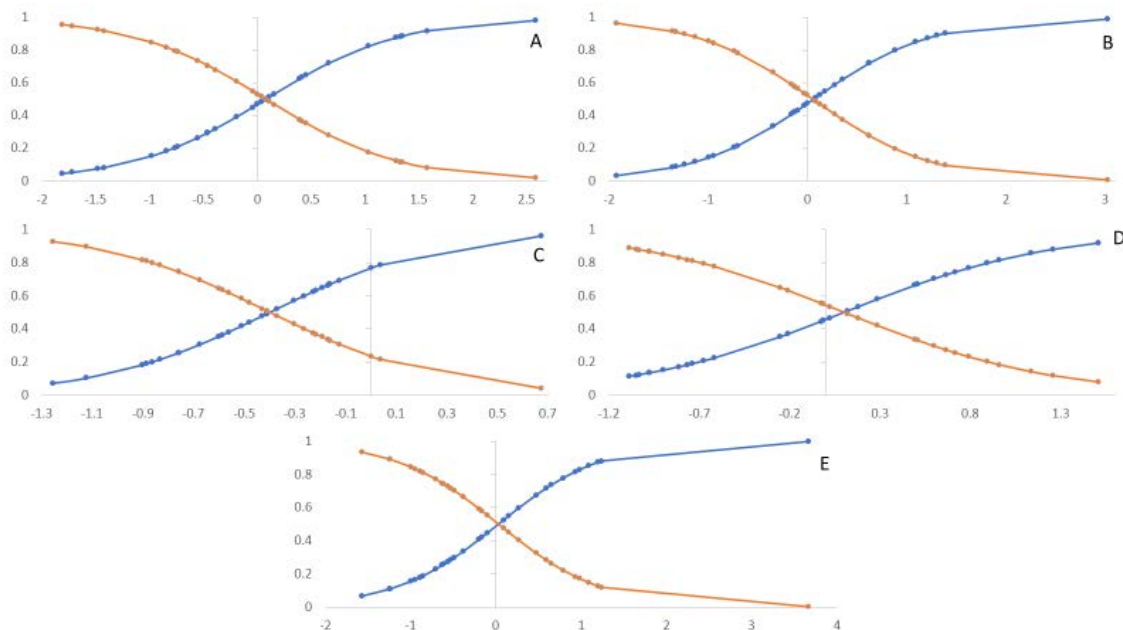


Figura 5. Regresiones logísticas entre los índices de sequía y los impactos reportados en Santa Cruz para el periodo 1970-1999; en el eje y se muestra la probabilidad y en el eje x los valores del índice: A) SPI para 6 meses, B) SPI para 12 meses, C) mRAI, D) RDI y E) índice Z. La línea azul representa la probabilidad de los casos en los que no hay impactos, la línea naranja las probabilidades para 1 o más impactos

Figure 5. Logistic regressions between drought indices and the impacts reported in Santa Cruz for the period 1970-1999. The y-axis shows the probability and on the x-axis the values of the index: A) SPI for 6 months, B) SPI for 12 months, C) mRAI, D) RDI and E) Z index. The blue line represents the probability of cases in which there are no impacts, the orange line the probabilities for 1 or more impacts

Cuando los índices empiezan a marcar diferentes tipos de sequía, estos reaccionan de forma muy similar para cada uno de los lugares de estudio, lo que muestra una alta probabilidad de que haya algún tipo de impacto. Sin embargo, existen sitios donde tienen una mejor capacidad para reproducir los impactos asociados a las sequías.

Lo anterior se confirma en el caso de Santa Cruz (**Figura 5**), ya que los índices SPI para 6 y 12 meses presentan una mayor probabilidad de detectar muchos impactos de sequía, al tener valores cercanos al 99 % cuando se encuentran en una categoría severamente seca (entre -1.5 y -2). Sin embargo, ambos son muy sensibles, ya que detectan altas probabilidades de muchos impactos cuando se encuentran en una categoría de leve a moderada (-0.5 a -1.5).

El índice mRAI muestra probabilidades superiores a 80 % en todos los cantones de estudio para detectar impactos de sequía cuando se encuentra en fases de sequía moderada, lo anterior también ocurre para RDI e índice Z.



4. Conclusiones

Utilizar índices de sequía para precisar la probabilidad de impactos en diferentes sectores resulta un ejercicio necesario en la definición de cuál índice logra representar mejor la sequía desde una perspectiva socio-productiva, lo que deja de lado aspectos físicos que han sido utilizados tradicionalmente para evaluarlos.

En general, el índice más apropiado para estudiar la sequía en comparación con los impactos socio-productivos es el SPI para escalas de 6 y 12 meses. En todos los cantones estudiados este presenta una alta (baja) probabilidad de muchos (cero) impactos cuando se encuentra en condiciones moderada y severamente secas (húmedas). Lo anterior lo convierte en un índice bastante robusto para los estudios de sequía, al ser frecuentemente recomendado por organizaciones internacionales y además reproduce los patrones de sequía espacialmente de una forma bastante apropiada (Quesada-Hernández *et al.*, 2019).

Para los demás índices (MRAI, RDI e índice Z) se observa una alta probabilidad de que se presenten impactos durante las categorías de sequías leves y moderadas. Esto podría implicar que ellos no detectan sequías de severidades altas o bien, las categorías que se están utilizando deberían de replantearse para cada sitio en donde se aplican.

Resulta fundamental, modificar la forma en que se estudia la sequía mediante índices que solo se enfocan en la ausencia de precipitación o cambios en la evapotranspiración. Es de gran importancia plantear la posibilidad de integrar factores sociales o productivos a los índices, los cuales tomen en cuenta condiciones asociadas a la vulnerabilidad como lo es la pobreza, actividades productivas que se desarrollan. Esto permitiría definir la gravedad de la sequía desde una perspectiva multidisciplinaria y no solo las cuestiones físicas. También, se deben de abordar las sequías más allá de un índice en específico, de forma tal que se utilice un grupo de índices que permita un análisis más robusto a la hora de tomar decisiones alrededor de estos eventos hidrometeorológicos extremos.

5. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan de forma completa y clara en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

6. Agradecimientos

La presente investigación se elaboró en el marco de varios proyectos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica: 805-B7-286 (apoyado por el Programa de Estudios Avanzados de la Universidad de Costa Rica, UCREA), 805-B7-507 (apoyado por CONICIT y MICITT), 805-B8-766 (Fondo de apoyo a Redes Temáticas de la Universidad



de Costa Rica), 805-A4-906 (PESCTMA) y 805-B9-454 (apoyado por el Fondo de Grupos de la Universidad de Costa Rica). Finalmente, agradecemos a las personas revisoras anónimas y a la Revista por los comentarios realizados a la versión final del documento.

7. Referencias

- Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, Li., Gao, S., Khan, A. y Mahmood, R. (2017). Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan, *Climate Dynamics*. 51, 1885-1899. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3987-0>
- Alfaro, E. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 62 (Supl. 4): 1-15. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i4.20010>
- Alfaro, E. J., Chourio, X., Muñoz, Á. G. y Mason, S. J. (2018a). Improved seasonal prediction skill of rainfall for the Primera season in Central America. *Internacional. Journal of. Climatology.*, e255-e268. <https://doi.org/10.1002/joc.5366>
- Alfaro, E. J. e Hidalgo, H. G. (2017). Propuesta Metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 16, 64-74.
- Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G. y Pérez-Briceño, P. M. (2018b). Mapping Environmental and Socioeconomic impacts of hydrometeorological Hazards across Central America. Study Case: Honduras. *Revista de Política Económica y Desarrollo Sostenible*. 3(1), 20-43. <https://doi.org/10.15359/peds.3-1.2>
- Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G., Maldonado, T., Pérez-Briceño, P. M. y Mora, N. P. (2018c). A Tri-dimensional Approach to Climate Sciences. Lessons from a Central American University. *Caribbean Quarterly*, 64:1, 26-56, <https://doi.org/10.1080/00086495.2018.1435333>
- Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Applied Meteorology*. 23, 1100-1109. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- Barber, C. B., Dobkin, D. P. y Huhdanpaa, H. T. (1996). The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 22, 469-483. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>
- Bayissa, Y., Tadesse, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Poulsen, C., Swigart, J. y Van Alden, S. (2018). *Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: a case study for Ethiopia*. GIScience & Remote Sensing. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1552508>





- Calvo-Solano, O., Quesada, L., Hidalgo, H. y Gotlieb, Y. (2018). Impactos de la sequía en la agricultura y la ganadería como un indicador de la seguridad alimentaria en el Corredor Seco Centroamericano: revisión bibliográfica. *Revista Agronomía Mesoamericana*. 29, 695-709. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- CCAD (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo). (2011). Atlas centroamericano para la gestión sostenible del territorio. Recuperado de: https://issuu.com/cathalac/docs/atlas_prevda
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*. 2, 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- Delaunay, B. (1934). Sur la sphère vide. *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*. 6, 793-800.
- Gotlieb, Y., P. M. Pérez-Briceño, H. G. Hidalgo y Alfaro E. J. (2019). The Central American Dry Corridor: A Consensus Statement and its Background. "Yu'am" *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático*, 3 (5) 42-51.
- Hänsel, S., Schucknecht, A. y Matschullat, J. (2016). The Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI)— is this an alternative to the Standardized Precipitation Index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics? *Theoretical and Applied Climatology*. 123, 827-844. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1389-y>
- Hidalgo, H., Alfaro, E., Amador, J. y Batisdas, A. (2019). Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor, *Climate Dynamics*. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>
- Hidalgo, H. G., Durán-Quesada, A. M., Amador, J. A. y Alfaro E. J. (2015). The Caribbean low-level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra Americas sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler, series a. Phys Geogr*. 97, 41-59. <https://doi.org/10.1111/geoa.12085>
- McKee, T. B., Doesken N. J. y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology Anaheim, California*, 17-22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179-184.
- Mishra, A.K. y Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391:202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Palmer, W. (1965). Meteorological drought. U. S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper. 45-58.
- Pérez-Briceño, P. M., Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G. y Jiménez, F. (2016). Distribución espacial de impactos de eventos hidrometeorológicos en América Central, *Revista de Climatología*. 16, 63-75.





- Quesada-Hernández, L., Calvo, O., Hidalgo, H., Pérez-Briceño, P. y Alfaro, E. (2019). Dynamical delimitation of the Central America Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values, *Progress in Physical Geography*. <https://doi.org/10.1177/0309133319860224>
- Quiring, S. M. (2009). Monitoring Drought: An Evaluation of Meteorological Drought Indices, *Geography Compass*. 3(1), 64-88. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00207.x>
- Rossi, G. (2000). Drought Mitigation Measures: A comprehensive framework. In: JV Vogt and F.Somma (eds) *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Springer, Netherlands. 233-246. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_18
- Steinemann, A., Iacobellis, S. F. y Cayan, D. (2015). Developing and Evaluating Drought Indicators for Decision-Making. *Journal of Hydrometeorology*. 16, 1793-1803. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0234.1>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38, 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tsakiris, G. y Vangelis, H. (2005). Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*. 9(10), 3-11.
- Van der Zee Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C. y Picado, L. (2012b). *Anexos del estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4)*. Tomo II. Fundación Internacional Acción Contra el Hambre (ACF). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de: <http://www.desaprender.org/clip/acf-fao-anexos-del-estudio-de-caracterizacion-del-corredor-seco-centroamericano-paises-ca-4-tomo-ii-1-pdf>
- Van der Zee Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C., y Picado, L. (2012a). Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4). Tomo I. Fundación Internacional Acción Contra el Hambre (ACF). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Disponible en: http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. y López-Moreno, J. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evaporation Index, *Journal of Climate*. 23, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Webb, R.W., Rosenzweig, C. E. y Levine E. R. (2000). Global Soil Texture and Derived Water Holding Capacities (Webb *et al.*). Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/548>





- Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*. 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Wilks, D. (2011). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, USA, *Academic Press*
- Wolter, K. y Timli, M.S. (1998). Measuring the strength of ENSO events -how does 1997-1998 rank? *Weather*. 53, 315-324. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x>
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs)*. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood)*. (WMO-No. 1090). Recuperado de: http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. & Khan, F.I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Review* 19, 333-349. <https://doi.org/10.1139/A11-013>

