

EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA CON INDICADORES ESTANDARIZADOS DE DIFERENTE ORIGEN EN CÓRDOBA, ARGENTINA

Antonio de la Casa¹, Gustavo Ovando¹, Guillermo Díaz¹ y Pablo Díaz¹

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

Email: delacasa@agro.unc.edu.ar

Abstract. Las sequías ocurren en la mayoría de las regiones agropecuarias del mundo, demandando un estado de alerta y monitoreo permanentes a los efectos de su detección oportuna. En este trabajo se analiza el desempeño de indicadores estandarizados de precipitación (SPI), evapotranspiración (SETI) y NDVI (SNDI), comparando su capacidad para evaluar la sequía en un contexto multiescalar en Córdoba, Argentina, entre 1999 y 2012. Si bien las variables básicas de los distintos indicadores de sequía están interrelacionadas, la relación de la precipitación tanto con la evapotranspiración como con el NDVI se presenta no lineal. La relación entre los distintos índices de sequía exhibe la máxima dispersión a escala mensual que se reduce al integrar mayor número de meses.

Keywords: precipitación, evapotranspiración, NDVI, multiescalar.

1 Introducción

La sequía constituye la principal adversidad en los sistemas de producción agropecuarios en la mayoría de las regiones agrícolas del mundo y sus consecuencias se proyectan hacia todo el ámbito productivo, hidrológico, energético y económico de una región [1]. Al ser un fenómeno que se instala de manera progresiva, la identificación del comienzo y la estimación del grado de severidad de cada evento de sequía se tornan un tema de difícil solución [2].

El análisis y monitoreo tradicional de las sequías en una base cuantitativa se ha realizado a partir de indicadores que representan la oferta y demanda de agua, haciendo uso sólo de información meteorológica debido a su mayor disponibilidad en tiempo y espacio. Sin embargo, tales índices no consideran la influencia de otros fac-

tores que exacerbaban o mitigan la influencia de la falta de agua sobre la vegetación. Evaluar la sequía agrícola conlleva necesariamente a conocer el estado de la vegetación, incrementando de esta manera la complejidad del fenómeno. Los datos espectrales que proveen los sistemas de teledetección constituyen una fuente de información potencialmente útil y resultan cada vez más accesibles para evaluar la sequía agrícola, en la medida que representan directamente el estado, vigor y productividad de la vegetación en un contexto territorial característico [3], [4], [5].

Entre los índices que emplean sólo registros de lluvia, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) desarrollado por [6], es ampliamente utilizado tanto por su flexibilidad como simpleza operativa y conceptual. Ha sido utilizado en regiones climáticas tanto húmedas como áridas [7], de la Argentina [8] y otras regiones del mundo [9]. Sin embargo, la fortaleza de emplear sólo información de lluvia para facilitar una evaluación temporal y espacial más extendida, configura también una debilidad en la medida que identifica estrictamente las sequías de tipo meteorológico.

Por su parte, [10] elaboró su clásico índice de severidad de sequía (PDSI) y [11] desarrollaron el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración potencial (SPEI) basados en información derivada del balance hidrológico. Este procedimiento se presenta, de manera intrínseca, como una herramienta más idónea para considerar la influencia de la falta o abundancia de agua sobre el crecimiento de la vegetación.

A partir de datos de reflectividad combinados en índices de vegetación espectral, también se han desarrollado indicadores que permiten evaluar el impacto de la sequía considerando directamente el estado y condición de la vegetación [12]. Con datos NDVI de NOAA AVHRR, [13] evaluaron el índice de la condición de vegetación (VCI) para monitorear los patrones de sequía a gran escala y evaluar el impacto de esta anomalía climática sobre la vegetación. Por su parte, [14] emplearon el VCI en un contexto agrícola. No obstante, la limitación de los indicadores de sequía que utilizan el NDVI radica en que la señal se satura bajo condiciones de vegetación den-

sa. De todos modos, la enorme ventaja que ofrece la teledetección es su capacidad de observación general del territorio a partir de una mirada única.

La disponibilidad de indicadores de distinta naturaleza permite realizar su confrontación para describir cuantitativamente una situación de sequía desde diferentes perspectivas y discernir acerca de su desempeño relativo [15]. En este sentido, [12] utilizaron la información radiométrica sobre el estado de la vegetación como variable dependiente, a los efectos de indagar el impacto de la sequía. Por su parte, [16] estimaron a partir de datos MODIS la reducción de la producción primaria en América del Sur entre 2000 y 2009, que asocian a la ocurrencia de una sequía generalizada durante dicho periodo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la dinámica que presenta la condición de sequía en el territorio de la provincia de Córdoba, Argentina, durante el periodo 1999-2012 a partir de indicadores estandarizados de precipitación, evapotranspiración y NDVI en un contexto multiescalar.

2 Materiales y métodos

2.1 Ubicación geográfica de los sitios evaluados

El análisis comparativo de la sequía en Córdoba se llevó a cabo de acuerdo a la localización de las estaciones meteorológicas que opera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuya localización se muestra en la Figura 1. De estas estaciones meteorológicas se obtuvieron valores diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, utilizados para obtener la temperatura media mensual (T_m), del período comprendido entre enero de 1998 a diciembre de 2012. Del mismo modo, la información radiométrica utilizada a los efectos de realizar el análisis detallado en cada lugar se obtuvo de acuerdo a la localización geográfica de las estaciones meteorológicas. Para la ciudad de Córdoba, la información radiométrica se extrajo sobre la localización del Aeropuerto Pajas Blancas, al norte de la ciudad, a fin de evitar la influencia

urbana sobre el NDVI. El resto de estaciones se sitúa en predios dedicados a la aeronavegación, relativamente alejados del ámbito urbano.

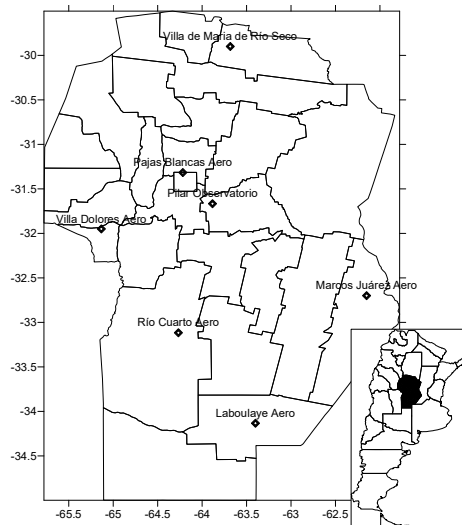


Fig 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en la provincia de Córdoba, Argentina, cuyos datos fueron empleados en este estudio: Pajas Blancas Aero (PB), Pilar Observatorio (PI), Marcos Juárez Aero (MJ), Laboulaye Aero (LB), Río Cuarto Aero (RC), Villa Dolores Aero (VD) y Villa de María de Río Seco (VM).

2.2 Datos e Índices de Sequía

2.2.1 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).

El SPI utiliza sólo datos de precipitación (PP) para representar el fenómeno. El cálculo de SPI para una localidad se basa en registros de lluvia de largo plazo correspondiente a un periodo de tiempo en particular, si bien en este caso, supeditado a la disponibilidad de datos radiométricos, el análisis se restringió al periodo 1999-2012. Este registro meteorológico es ajustado a una distribución de probabilidades gamma, la cual es transformada en una distribución normal de modo que el valor promedio del SPI para una localidad y período sea cero [17]. Dado que el SPI está normalizado, los climas húmedos y áridos pueden representarse de la misma manera y así los períodos húmedos y secos ser monitoreados empleando el SPI. A los efectos de su cálculo del SPI se siguieron las indicaciones del manual de usuario de la Organiza-

ción Meteorológica Mundial, y sus resultados para periodos de 1, 3, 6, 9 y 12 meses se obtuvieron a partir de programa de cómputo provisto [18]. Las categorías de humedad/sequía consideradas fueron: $SPI > 2.0$ (extremadamente húmedo, 3), de 1.5 a 1.99 (muy húmedo, 2), de 1.0 a 1.49 (moderadamente húmedo, 1), entre -0,99 y 0,99 (próximo a normal, 0), de -1.0 a -1.49 (moderadamente seco, -1), de -1.5 a -1.99 (severamente seco, -2), y < -2.0 (extremadamente seco, -3).

2.2.2 Índice Estandarizado de Evapotranspiración (SETI)

Reconociendo la importancia de disponer de un indicador de sequía que considere también la influencia de la reserva de agua del suelo, este trabajo propone utilizar el índice estandarizado de evapotranspiración (SETI), siendo la evapotranspiración real (ET) la variable seleccionada para representar la disponibilidad de agua. Con los valores mensuales de PP y Evapotranspiración Potencial (ETP), que se calculó con el método de Thornthwaite [19] a partir de T_m , el valor de ET se estimó de acuerdo a los resultados del balance de agua secuencial de Thornthwaite [20], utilizando distintas condiciones de retención de agua del suelo dependiendo de cada lugar (300 mm para MJ y LB, 250 mm para PI, RC, PB y VM, y 150 mm para VD).

La obtención de SETI es conceptualmente similar a SPI. Los valores de ET en primer lugar son ajustados a una función de distribución gamma γ , luego, estos valores son transformados usando una distribución normal inversa para estandarizar los resultados. A los efectos de su cálculo y para asegurar la compatibilidad de los resultados se aplicó el mismo programa usado para obtener SPI, considerando de igual modo lapsos de 1, 3, 6, 9 y 12 meses.

2.3.3 Índice Estandarizado de NDVI (SNDI)

Se emplearon en este estudio datos de NDVI del satélite SPOT-VEGETATION provistos por el centro de procesamiento de imágenes de VEGETATION (CTIV) del instituto *Flemish Institute for Technological Research* (VITO). Se utilizó el producto S10 NDVI SPOT-VEGETATION, que es una compo-

sición de 10 días que emplea el algoritmo del valor máximo compuesto (MCV). Este producto contiene solamente valores de NDVI escalados entre 0 y 255 sin información de las bandas espectrales originales ni ángulos de vista y tampoco ángulo solar. La resolución espacial es de 1 km y las imágenes fueron corregidas geométrica y radiométricamente y disponibles para toda la serie de imágenes de 10 días entre abril de 1998 hasta diciembre de 2012, correspondiente al territorio geográfico de Argentina. Solo se emplearon 9 píxeles de cada sitio, siendo el pixel central el más próximo a la estación meteorológica.

En este caso, el SNDI se obtuvo utilizando la serie de tiempo de los datos NDVI expresados por medio de los contadores digitales (CD) originales de la imagen. Esta serie, con valores entre 0 y 255, se procesó utilizando el mismo programa de cómputo que calcula el SPI de modo que, ajustados a la distribución gamma y luego estandarizados, sus valores presentan una escala similar al resto de los indicadores y facilita el análisis comparado.

3 Resultados y discusión

3.1 Relación entre las variables meteorológicas, hidrológicas y radiométricas básicas

La Figura 2 muestra en distintas localidades de Córdoba las relaciones entre las tres variables elementales que se utilizan para obtener los indicadores estandarizados de sequía: precipitación (PP), evapotranspiración (ET) derivada del balance hidrológico y NDVI, utilizando a la primera de ellas como variable independiente. De acuerdo al gradiente de humedad característico en el centro de la Argentina [21], mientras MJ y LB se ubican en un sector más húmedo al este de la región, VD presenta el mayor rasgo de aridez hacia el oeste. Por su parte, PB, PI, RC y VM ocupan una posición central en el territorio bajo una condición subhúmeda (Figura 1). Las relaciones se describen y evalúan estadísticamente a partir de funciones de ajuste lineal, logarítmica y un polinomio de 2º grado, estas últimas a fin de considerar un eventual comportamiento no lineal. Los valores nulos de PP se reemplazaron por 0.1 mm para poder aplicar el modelo logarítmico.

La Figura 2 muestra una asociación relativamente estrecha entre las variables primitivas de los indicadores de sequía. Así, se interpreta que el aporte de agua de lluvia ejerce una influencia preponderante sobre el estado y condición de la vegetación en la región que repercute, tanto sobre el consumo de agua (ET), de acuerdo a la estimación del balance hidrológico, como en la producción de biomasa, de acuerdo a los valores de NDVI, y explica la interdependencia que existe entre las variables.

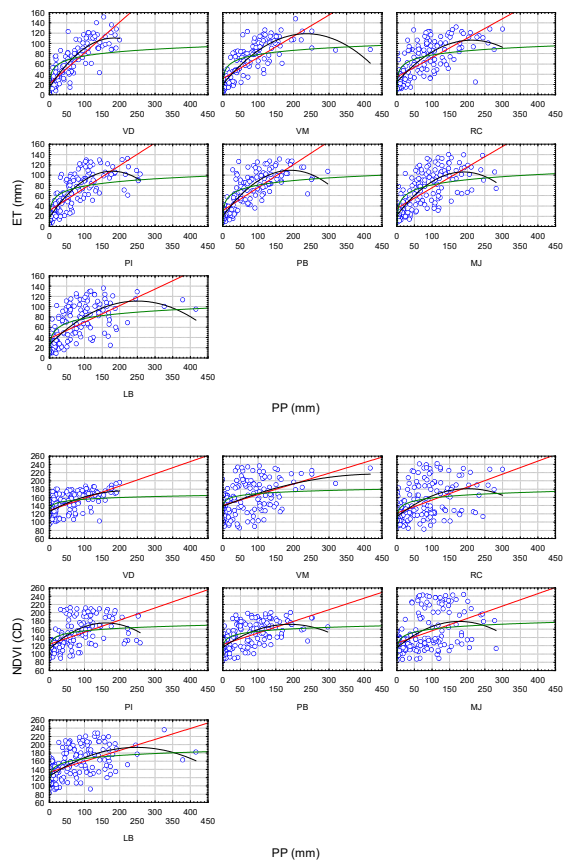


Fig. 2. Relación de los valores mensuales de precipitación (PP) con la evapotranspiración (ET) y NDVI (expresado en CD) en las estaciones meteorológicas de Córdoba.

Si bien el modelo de ajuste logarítmico tiene el coeficiente de determinación más bajo, se presenta apropiado en particular para describir la influencia de los valores de lluvia más elevados, tanto sobre el consumo de agua (ET) como sobre la condición de la vegetación (NDVI). En este sentido, los valores extremos de lluvia mensual representan de manera más aproximada a los registros de ET y NDVI cuando se estiman con el modelo parabólico, indicando que cuando la lluvia supera cierto valor máximo, tanto ET como NDVI tienden a decrecer. De esta forma, se verifica la ocurrencia de una relación no lineal entre la disponibilidad de agua y el crecimiento de la vegetación, como fuera señalado por [22], efecto que es menos acentuado sólo en VD donde el ambiente es de mayor aridez.

Por otra parte, de acuerdo con distintos autores [12], [23], [24], existe un retardo entre la ocurrencia de lluvia y su influencia sobre el crecimiento de la vegetación que expresan los datos radiométricos. Este efecto también fue puesto de manifiesto por [25] cuando estimaron la variación del NDVI en función al contenido de agua del suelo del mes previo. De la misma forma, la demora entre el aporte hídrico y su repercusión sobre el crecimiento vegetal se refleja al considerar el consumo de agua. Este comportamiento en los distintos sectores de la región se pone de manifiesto en la Figura 3.

La Figura 3 muestra no sólo la dependencia de carácter significativa ($P < 0,001$) entre los valores estimados del consumo de agua (ET) y la producción de biomasa, utilizando los valores de NDVI a modo de proxy, sino que el ajuste lineal de la relación mejora substancialmente cuando se considera la información radiométrica del mes subsecuente, aumentando de manera ostensible el rango de los valores de R^2 en la región, que pasa de [0,26 – 0,60] a [0,60 – 0,86] cuando se aplica el análisis con retardo. De esta forma, la estrecha interrelación que existe entre PP, ET y NDVI, es decir la información primitiva utilizada para evaluar la condición de sequía, permite conjeturar que esta interdependencia también debe proyectarse sobre el comportamiento de los respectivos indicadores del fenómeno.

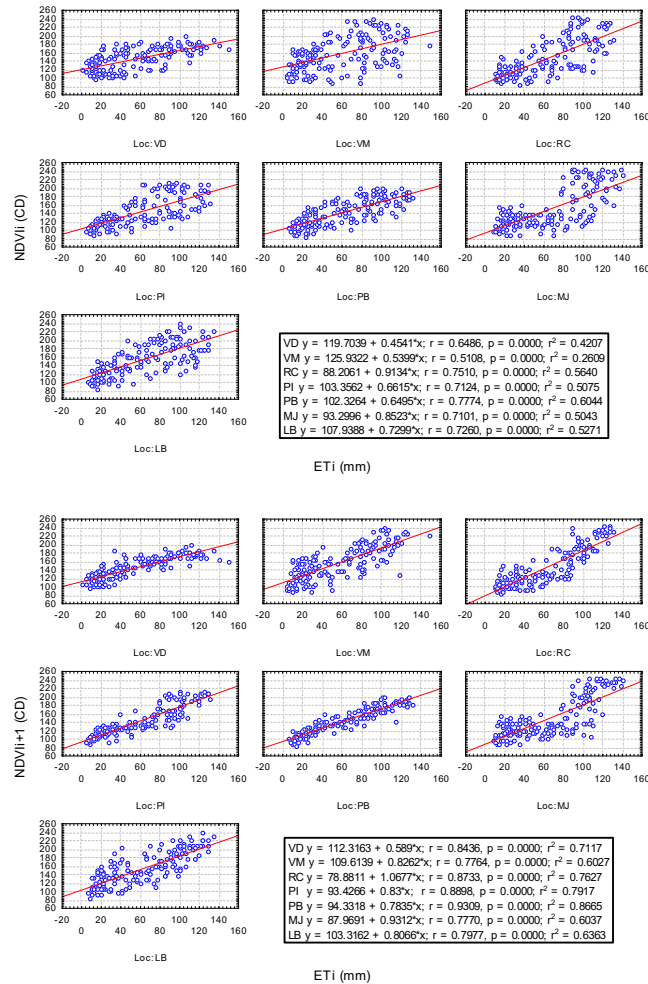


Fig. 3. Relación entre la evapotranspiración mensual (ET) y el NDVI en contadores digitales (CD) del mes actual i (arriba) y del mes posterior i+1 (abajo) en distintos sitios de Córdoba.

3.2 Análisis del desempeño de los indicadores estandarizados de sequía.

Calculados los indicadores estandarizados de sequía y a los efectos de analizar comparativamente su comportamiento, la Tabla 1 constituye una síntesis con los principales resultados del análisis de correlación para el conjunto de sitios de la región

en estudio. Además, se evalúan diferentes escalas de tiempo y tanto el SNDI_i actual como del mes subsecuente (SNDI_{i+1}) se adoptan alternativamente como variable independiente.

Las correlaciones que se obtienen son positivas y, con la única excepción de Marcos Juárez cuando se considera SNDI del periodo actual, en todos los casos presentan un carácter significativo ($P < 0,05$). En virtud de esto, el desempeño de los indicadores estandarizados de sequía se evalúa de acuerdo a la relación que alcanza el coeficiente de correlación más elevado. En este sentido, el análisis comparado de los distintos indicadores de sequía muestra que SETI, derivado del procedimiento de balance de agua, constituye la señal más correlacionada con SNDI, cualquiera sea el periodo de acumulación (escala) y la condición climática de la región considerada.

Otro rasgo sobresaliente de los resultados se refiere directamente a la condición de retardo que experimenta la señal del NDVI respecto tanto a PP como a ET. La correlación mejora substancialmente cuando la relación entre los indicadores de sequía se realiza con respecto al indicador espectral del mes posterior, teniendo siempre valores más elevados cuando se analiza SETI.

La relación entre los distintos índices estandarizados de sequía exhibe mayor dispersión cuando la escala es mensual, y presentan los valores de correlación más bajos en MJ, que corresponde a la condición climática más húmeda en el este de Córdoba. La dispersión se reduce a medida que el periodo considerado acumula un mayor número de meses de modo que, con el incremento de la correlación, se pone de manifiesto el comportamiento cada vez más similar de los indicadores. Mientras en el corto plazo cada indicador de sequía representa la contingencia adversa de una manera particular, cuando su comportamiento se analiza de manera agregada temporalmente existe, en cambio, una tendencia generalizada de expresar tanto la falta como la abundancia de agua de manera similar por los distintos indicadores.

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre los indicadores estandarizados de sequía (SPI, SETI y SNDI) para diferentes escalas temporales en los sitios de la Provincia de Córdoba que indica la Figura 1.

	<i>SPI_1</i>	<i>SETI_1</i>	<i>SPI_3</i>	<i>SETI_3</i>	<i>SPI_6</i>	<i>SETI_6</i>	<i>SPI_9</i>	<i>SETI_9</i>	<i>SPI_12</i>	<i>SETI_12</i>
PI										
<i>SNDI_1</i>	0.2286	0.5234								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4192	0.6818								
<i>SNDI_n</i>			0.4426	0.7637	0.5768	0.8440	0.6975	0.8846	0.7628	0.9010
PB										
<i>SNDI_1</i>	0.1730	0.4275								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4982	0.6325								
<i>SNDI_n</i>			0.3933	0.6916	0.5261	0.7804	0.5636	0.8355	0.5960	0.8562
MJ										
<i>SNDI_1</i>	0.0931	0.2448								
<i>SNDI_1+1</i>	0.2604	0.3236								
<i>SNDI_n</i>			0.2111	0.3900	0.3117	0.5043	0.3099	0.5552	0.3832	0.6147
LB										
<i>SNDI_1</i>	0.2053	0.3955								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4232	0.4928								
<i>SNDI_n</i>			0.3576	0.5831	0.4166	0.6670	0.3882	0.6216	0.3917	0.6158
VMRS										
<i>SNDI_1</i>	0.2051	0.4809								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4544	0.6392								
<i>SNDI_n</i>			0.4619	0.6641	0.6309	0.8090	0.6728	0.8279	0.7026	0.8434
VD										
<i>SNDI_1</i>	0.3248	0.4286								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4622	0.5100								
<i>SNDI_n</i>			0.5737	0.6098	0.6881	0.6525	0.7247	0.7004	0.7571	0.7470
RC										
<i>SNDI_1</i>	0.2756	0.4107								
<i>SNDI_1+1</i>	0.4248	0.4150								
<i>SNDI_n</i>			0.3587	0.5776	0.6000	0.5878	0.6523	0.5600	0.6961	0.5146

SNDI_n: SNDI de 3; 6; 9 ó 12 meses según sea correlacionado con valores de SPI y SETI correspondientes

4 Conclusiones

La lluvia (PP) ejerce una influencia preponderante sobre el estado y condición de la vegetación que se expresa tanto sobre el consumo de agua (ET), como en la producción de biomasa, de acuerdo al indicador espectral de la vegetación (NDVI), aunque estas relaciones exhiben fuerte evidencia de un comportamiento no lineal en la región.

Si bien las variables básicas de los distintos indicadores de sequía están interrelacionadas, la relación de precipitación tanto con evapotranspiración como con NDVI se presenta no lineal.

La relación entre los distintos índices de sequía exhibe máxima dispersión a escala mensual y se reduce al integrar mayor número de meses.

Referencias

1. Mishra and Singh, 2010 Mishra, A. K. and Singh, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216. (2010).
2. Beyene, B.S. van Loon, A.F., van Lanen, H.A.J. and Torfs, P.J.J.F. Investigation of variable threshold level approaches for hydrological drought identification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 11, 12765–12797. (2014).
3. Zhang, P. Anderson, B. Tan, B. Huang, D. and Myneni, R. Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. *Agric. For. Meteorol.* 132: 344–358.(2005).
4. Chakraborty, A. and Sehgal V.K. Assessment of agricultural drought using MODIS derived Normalized Difference Water Index. *Journal of Agricultural Physics* 10: 28–36. (2010).
5. Wardlow, B.D. Anderson, M.C. Sheffield, J. Doorn, B.D. Verdin, J.P. Zhan, X. and Rodell, M. Future opportunities and challenges in remote sensing of drought. *Drought Mitigation Center Faculty Publications.* 103. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/103>. (2012).
6. McKee, T.B. Doesken N.J. and J. Kleist. 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. (1993).
7. Wu, H. Svoboda, M.D. Hayes, M.J. Wilhite, D.A. and Wen, F. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *Int. J. Climatol.* 27(1):65–79.(2007).
8. Seiler, R.A. Hayes, M.J. and Bressan, L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology* 22(11): 1365–1376. (2002).
9. Patel, N.R. Chopra P. and Dadhwal V.K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications* 14:329–336. (2007).
10. Palmer, W.C. Meteorological drought. US Department of Commerce Weather Bureau Research Paper No. 45. (1965).
11. Vicente-Serrano, S.M. Beguería, S. and López-Moreno, J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate* 23(7): 1696–1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1. (2010)
12. Ji, L. and Peters, A.J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sens. Environ.* 87: 85–98.(2003).
13. Liu, W.T. and Kogan, F.N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing* 17(14):2761-2782.(1996).
14. Quiring, S.M. and Srinivasan, G. Evaluating the utility of the vegetation condition index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agri. For. Meteorol.* 150: 330–339. (2010).
15. Sun, L. Mitchell, S.W. and Davidson, A. Multiple drought indices for agricultural drought risk assessment on the Canadian prairies. *Int. J. Climatol.* 32: 1628–1639. (2012).
16. Zhao, M. and Running, S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329:940–943. (2010).
17. Edwards, D.C. and McKee, T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. (1997).

18. World Meteorological Organization. Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). WMO-No. 1090, Geneva. (2012).
19. Thornthwaite, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55–94.(1948).
20. McCabe, G.J. and Markstrom, S.L. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p. <http://water.usgs.gov/lookup/get?cresearch/mms/thorn>. (2007).
21. de la Casa, A. y Rodríguez, A. Zonificación agroclimática de la provincia de Córdoba. Tercera parte: sistemas agrícolas sugeridos y sus riesgos climáticos asociados en tres localidades de la provincia de Córdoba. AADA. Actas V Reunión Argentina de Agrometeorología: 177-191. (1991).
22. Nicholson, S.E. and Farrar, T.J. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sensing of Environment*, 50: 107–120. (1994).
23. de la Casa, A.C. y Ovando, G.G. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (INTA)* 35(1):67–85. (2006).
24. Zhang, F. Zhang, L. Wang, X. and Hung, J. Detecting agro-droughts in southwest of China using MODIS satellite data. *Journal of Integrative Agriculture* 12(1): 159–168. (2013).
25. Zribi, M. Paris Anguela, T. Duchemin, B. Lili, Z. Wagner, W. Hasenauer, S. and Chehbouni, A. Relationship between soil moisture and vegetation in the Kairouan plain region of Tunisia using low spatial resolution satellite data. *Water Resources Research* 46, W06508, doi:10.1029/2009WR008196. (2010).