

Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS

García, Sandra G. ^{1a}; Baille, Alain ^b; González, María M. ^b; Martínez, Victoriano ^b;
Urrea, Mario ^c; Hernández, Zaida ^a; Nortes, Pedro ^b y Tanguy, Maliko ^b

^(a) Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena.
Paseo Alfonso XIII, 52. 30203, Cartagena, Murcia, España

^(b) Departamento de Ingeniería de los Alimentos y del Equipamiento Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena.

Paseo Alfonso XIII, 48. 30203, Cartagena, Murcia, España

^(c) Confederación Hidrográfica del Segura.

Plaza Fontes, 1. 30001, Murcia, España

RESUMEN

Una rápida detección y caracterización espacio-temporal de las sequías contribuye en la generación de estrategias de mitigación de sus impactos. Se ha realizado una aproximación al problema de la alerta temprana frente a sequías a nivel regional en cuencas del sureste español, considerando indicadores basados en teledetección y datos meteorológicos. De los resultados obtenidos, se concluye que índices probabilísticos, basados solo en precipitación, no exhiben el comportamiento espacio-temporal observado desde imágenes satélite.

Palabras clave: sequías, teledetección, estrés hídrico.

ABSTRACT

An early detection and spatio-temporal characterization of droughts contributes to the generation of mitigation plans about its impacts. A novel approach to the drought early warning has been carried out in a regional level in south-eastern Spanish basins, based on the integration of remote sensing data and meteorological information. From results we conclude that probabilistic indexes, based just on precipitation data, do not exhibit the drought patterns detected by remote sensing images.

Keywords: droughts, remote sensing, water stress.

Introducción

Las cuencas del Sureste Español, al igual que la mayoría de las regiones Mediterráneas, se ven periódicamente afectadas por sequías que afectan grandes extensiones. Su severidad y frecuencia ha aumentado en los últimos años, debido a los efectos del cambio climático.

En orden a evaluar las posibles condiciones de sequía, así como el estado de humedad del suelo de la cuenca, se pueden aplicar distintas metodologías de estimación operacional de índices relacionados con el déficit hídrico del suelo y estrés hídrico de la vegetación. Se distin-

guen aquellas basadas en datos meteorológicos, en teledetección y en procesos.

Respecto a los indicadores basados en datos meteorológicos, destaca el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, Standardized Precipitation Index), y el indicador CWSI (Crop Water Stress Index) propuesto por Moran *et al.* (1994).

Entre los indicadores basados en teledetección, se encuentran aquellos obtenidos mediante la interpretación del espacio descrito por la representación temperatura superficial (LST, Land Surface Temperature) vs. el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). La rela-

¹ Contacto autor: Te: +34 968325935 Fax: +34 968325435
Correo electrónico: sandra.garcia@upct.es

ción entre la temperatura superficial y el régimen de humedad en el suelo permite detectar la aparición de condiciones de sequía, antes de que se produzcan efectos fuertemente negativos en la vegetación y los cultivos.

Los indicadores basados en procesos se refieren a la modelización de la evapotranspiración real, simulando la transferencia de masa y energía entre la atmósfera y la superficie.

Otros indicadores físicos de sequía incluyen los efectos en series hidrológicas (tanto niveles en embalses, caudales bajos en cauces, como niveles en acuíferos), incluso los efectos del ENSO.

Aspectos Metodológicos

La estimación de índices de estrés hídrico desde teledetección ha sido abordada por distintos autores (Moran *et al.*, 1994; Wang, 2001; Fensholt y Sandholt, 2003). El método clásico de seguimiento y evaluación del nivel de estrés de la vegetación es la utilización combinada de los datos de LST y de reflectancia multispectral de la superficie, de los que se deriva NDVI.

El espacio conformado por la representación gráfica de LST vs. NDVI proporciona información sobre el estrés de la vegetación y las condiciones de humedad del suelo. En algunos casos, este espacio presenta una forma triangular como se observa en la Figura 1, mientras que en otras ocasiones se ajusta más a un trapecio. Dicha figura representa la distribución de zonas de suelo desnudo, de cobertura parcial y total de la vegetación en el área de estudio.

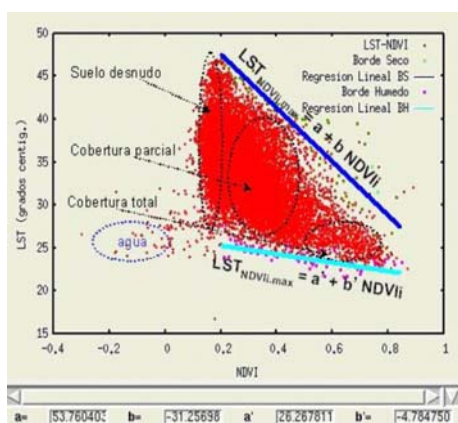


Fig. 1. Espacio LST-NDVI para el periodo 14/09/01-29/09/01. Cuenca del Río Segura.

Distintos autores han observado este comportamiento, tanto triangular (Price, 1990; Carlson *et al.*, 1994) como trapezoidal (Moran *et al.*, 1994), cuando los datos representan un rango completo de coberturas de vegetación y contenidos de humedad del suelo.

El índice de déficit hídrico (WDI, Water Deficit Index), propuesto por Moran *et al.* (1994), se deriva de la interpretación del trapecio basado en la relación entre la diferencia de temperatura superficial y temperatura del aire (LST-Ta) y el índice de vegetación. En el presente trabajo, se aplica la aproximación de WDI, propuesta por Verstraeten (2001), dado que solamente requiere como dato de entrada Ta siendo factible su aplicación a nivel regional y cercano al tiempo real.

Sobre la base del espacio triangular se han propuesto varios índices espacio-temporales. Entre ellos, el índice de sequedad temperatura-vegetación TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) desarrollado por Sandholt *et al.* (2002) para evaluar el estado de humedad del suelo, y el índice de condición temperatura-vegetación VTCI (Vegetation Temperature Condition Index) ampliamente utilizado para seguimiento de sequías en las planicies de EE.UU. (Wang *et al.*, 2001).

A continuación, se describen brevemente los indicadores utilizados en el presente trabajo.

Índice de Sequedad Temperatura-Vegetación (TVDI, Temperature Vegetation Dryness Index)

El índice TVDI, inversamente correlacionado con la humedad del suelo, se expresa como (Sandholt *et al.*, 2002):

$$TVDI = \frac{LST_{NDVIi} - LST_{NDVIi.min}}{LST_{NDVIi.max} - LST_{NDVIi.min}} \quad (1)$$

donde:

$$LST_{NDVIi.max} = a + bNDVIi \quad (2)$$

$$LST_{NDVIi.min} = a' + b'NDVIi \quad (3)$$

La Figura 1, representa las rectas de regresión $LST_{NDVIi.max}$ y $LST_{NDVIi.min}$, que definen el «borde seco» y «borde húmedo» del triángulo, respectivamente. El borde seco representa la tasa de evapotranspiración mínima (zonas secas), mientras que el borde húmedo da su máximo valor (zonas sin restricción de agua).

Índice de Condición Temperatura-Vegetación (VTCI, Vegetation Temperature Condition Index)

Propuesto por Wang *et al.* (2001), y aplicado ampliamente por Wan *et al.* (2004) para el seguimiento de sequías, se define como:

$$VTCI = \frac{LST_{NDVIi,max} + LST_{NDVIi}}{LST_{NDVIi,max} - LST_{NDVIi,min}} \quad (4)$$

Índice de Déficit Hídrico (WDI, Water Deficit Index)

A diferencia del indicador CWSI, útil para superficies completamente cubiertas por vegetación, el índice WDI puede aplicarse a zonas semiáridas cubiertas por superficies mixtas (vegetación y suelo desnudo). WDI cuantifica la tasa relativa de flujo de calor latente (o evapotranspiración), presentando valor 0 para superficies completamente húmedas (evapotranspiración sólo limitada por la demanda atmosférica), y 1 para superficies secas donde no existe flujo de calor latente.

Se expresa como sigue (Verstraeten *et al.*, 2001):

$$WDI = \frac{\Delta LST_{NDVIi,min} - \Delta LST_{NDVIi}}{\Delta LST_{NDVIi,min} - \Delta LST_{NDVIi,max}} \quad (5)$$

donde las ecuaciones que determinan los bordes del trapezoide (o espacio), se definen como rectas de regresión que delimitan la tasa mínima y máxima de evapotranspiración real (ET_{real}):

Mínima ET_{real} (o borde seco):

$$\Delta LST_{NDVIi,max} = a + bNDVIi \quad (6)$$

Máxima ET_{real} (o borde húmedo):

$$\Delta LST_{NDVIi,min} = a' + b'NDVIi \quad (7)$$

Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, Standardized Precipitation Index)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) es un indicador probabilístico que considera sólo la precipitación (Mc Kee *et al.*, 1995). Fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación en múltiples escalas temporales, desde semanas a meses.

Las probabilidades son estandarizadas por lo que un valor de cero indica la cantidad de precipitación media. El índice es negativo para sequías y positivo, en caso contrario. Como las condiciones de sequedad y humedad pueden volverse más severas, el índice será más negativo o positivo respectivamente.

Cuenca de estudio y procesamiento de la información

Cuenca del estudio

El área de estudio donde se han llevado a cabo la mayoría de los análisis corresponde a la Cuenca del Río Segura. Esta cuenca, una de las más secas de Europa, se caracteriza por la irregularidad de sus precipitaciones y por su clima mediterráneo semiárido. Se localiza en el sureste de la península ibérica (Figura 2).

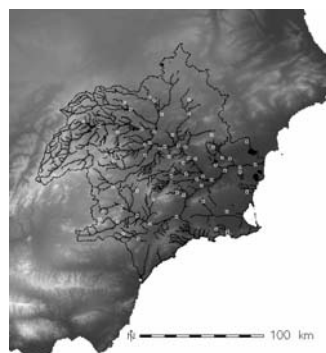


Fig. 2. Cuenca del Río Segura.

El aumento progresivo en la Cuenca de las demandas hídricas asociadas a la actividad económica y a la transformación del territorio, junto al incremento en la frecuencia de las sequías vinculado al cambio climático, contribuyen a situaciones deficitarias de agua casi permanentemente.

Procesamiento de información satelital y meteorológica

La metodología de seguimiento de las condiciones de sequía que se propone, se basa en datos de reflectancia superficial y de propiedades térmicas obtenidos desde el sensor TERRA MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), y en información meteorológica (pluviometría y termometría).

Se ha hecho uso de composiciones de imágenes satélite de 8 días para temperaturas superficiales y de 16 días para el índice de vegetación, ambas con resolución espacial de 1 km. (productos MOD11A2 y MOD13A2 respectivamente). Para el período 2000-2006, se han generado los espacios LST vs. NDVI y (LST-Ta) vs. NDVI, utilizando composiciones de 16 días. Se han considerado los valores máximos de LST del período de acuerdo a la opinión de distintos autores (Chilar *et al.*, 1994; Park *et al.*, 2002a; Park *et al.*, 2002b), que han demostrado que representan de manera más realista las condiciones superficiales.

La información meteorológica integra series temporales largas de precipitación (19 estaciones gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Segura), y temperatura diaria (42 estaciones del Servicio de Información Agraria, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia).

Para un correcto y eficaz procesamiento de la información, se ha hecho uso del Sistema de Información Geográfica GRASS (Geographical Resources Analysis Support System). Ello ha facilitado la aplicación de las metodologías propuestas, y el análisis de resultados espacio-temporales.

Análisis de resultados

Espacios LST-NDVI

Desde el análisis de los espacios LST-NDVI generados para el periodo 2000-2006, se observa que el borde seco describe siempre una correlación negativa con NDVI, mientras que el borde húmedo puede presentar correlaciones tanto positivas como negativas.

Se ha detectado que en años húmedos (Figura 3), en general, el borde húmedo se correlaciona negativamente con NDVI (b' negativa). Mientras que en años secos (Figura 4), se observa un cambio de pendiente, (b' positivo), y persistencia de esta condición mientras se mantienen las condiciones de sequedad. Este comportamiento puede actuar como un indicador temprano de condiciones de estrés hídrico de la vegetación, puesto que para que exista sequía no sólo deben presentarse situaciones de estrés hídrico, sino también una persistencia de estas condiciones.

Índices WDI, TVDI y VTCl

Como se ha comentado, se han derivado los espacios "LST-NDVI para cada fecha a partir de las correspondientes distribuciones espaciales.

Las Figuras 5 y 6 representan la evolución temporal de los indicadores WDI, TVDI y VTCl, para el periodo de inicio de condiciones de sequía. Desde las mismas se observa que tanto WDI, como TVDI y VTCl, varían entre 0 y 1. Dado que VTCl se halla directamente correlacionado con la humedad del suelo, las zonas más secas presentarán los valores más bajos de VTCl, y más altos de WDI y TVDI.

Índice SPI

Distribuciones espaciales de SPI para distintas escalas temporales (semanas a meses), han sido obtenidas mediante interpolación espacial de datos puntuales (método de inverso de la distancia al cuadrado) Del análisis de los resul-

tados, se deduce que el año 2000 y comienzos del 2001 fueron relativamente secos. Los años 2005 y 2006 (muy secos), presentan los valores más negativos de SPI para el período. Desde SPI a escala temporal de 12 meses no se detectan claramente los periodos secos del año 2004 (Figura 7), sin embargo sí se observan a otras escalas temporales (semanal).

Discusión

Se ha comprobado que durante condiciones de sequedad (menor disponibilidad de humedad del suelo) el incremento de la temperatura superficial (que involucra temperatura de la vegetación como temperatura del suelo, según la celda), se comporta como un buen indicador del estrés de la vegetación que precede al inicio de la sequía.

Como comentan Wan *et al.*, (2004), la respuesta de la vegetación a condiciones de elevada temperatura puede ocurrir aún cuando la vegetación está verde, debido a una regulación estomática para minimizar la pérdida de agua por transpiración. Esta situación conlleva una reducción del flujo de calor latente y, por consiguiente, un aumento del flujo de calor sensible que redundará en un aumento de la temperatura foliar con respecto a la del aire. Este incremento de temperatura suele utilizarse para identificar situaciones de estrés en los cultivos.

Este hecho explica el aumento de los valores de temperatura superficial (LST) observados (aún con altos valores de NDVI), correspondientes a un cambio de pendiente del borde húmedo del espacio LST-NDVI en periodos de déficit hídrico, observándose pendientes positivas del borde húmedo (b'). La persistencia de estas condiciones, pendiente b' positiva, se ha demostrado que determina el inicio de un período de sequía.

Conclusiones

Se ha demostrado que el seguimiento temporal del espacio LST-NDVI e incluso de las distribuciones espaciales de los indicadores VTCl, TVDI y WDI, dada la robusta base teórica en que se sustentan, permite detectar condiciones de escasez hídrica o de sequía.

Así el patrón espacial de la sequía (variabilidad y grado de severidad) se puede identificar desde la distribución espacial de estos índices en series temporales, mientras que desde el análisis del espacio LST-NDVI se puede detectar un cambio de tendencia en la recta del borde húmedo y de esta forma el inicio (y fin) de condiciones de sequía.

El seguimiento dinámico del indicador basado en datos meteorológicos SPI y los indicadores basados en teledetección (WDI, TVDI y VTCI) ofrece resultados diferentes en cuanto a los episodios secos, mientras que existe una buena correlación entre los indicadores basados en teledetección. El análisis e interpretación de los patrones espaciales (así como de series temporales), ha revelado que los valores de SPI negativos no siempre se corresponden con las zonas identificadas desde teledetección como sujetas a sequía. Esta conclusión es coherente con la obtenida recientemente por otros autores como Bhuiyan *et al.* (2006). Este resultado es importante, puesto que el uso de SPI como claro indicador de sequía está muy extendido. Debe resaltarse que SPI es un indicador probabilístico de déficit de precipitación, es decir, permite identificar la causa de la sequía pero no considera su impacto. Por ello, puede ocurrir que la sequía se manifieste en componentes del ciclo hidrológico, y vegetativo (estrés hídrico), aún con valores de SPI positivos.

Referencias

- Bhuiyan, C., Singh, R.P., y Kogan, F.N., 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8: 289–302.
- Carlson, T. N., Gillies, R. R., y Perry, E. M., 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9, 161–173.
- Fensholt, R. y Sandholt, I., 2003. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87 (1): 111-121.
- Mc Kee, T. B., Doesken, N. J., y Kleist, J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. Boston, MA. American Meteorological Society: 233-236.
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 49, 246-263.
- Park, S., Feddema, J.J., y Egbert, S. L., 2004. Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. *Remote Sensing of Environment*, 89: 53-62.
- Price, J. C., 1990. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 940–948.
- Ranjan Parida, B., 2006. Analysing the effect of severity and duration of Agricultural drought on crop performance using Terra/MODIS Satellite data and Meteorological data. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (NRSA). India.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. y Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79 (2-3): 213-224.
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., and Feyen, J., 2001. Monitoring water limited carbon mass fluxes over Europe using NOAA-AVHRR imagery and an adapted PEM Model C-FIX.
- Wan, Z., Wang, P. and Li, X., 2004. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 61-72.
- Wang, P.X. Li, X., Gong, J., Song, C., 2001. Vegetation Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring. *IEEE*, 141-143.

Agradecimientos

El trabajo presentado se enmarca en tareas del Convenio «Desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana frente a Sequías para las Cuencas del Río Júcar y Segura», entre la Universidad Politécnica de Cartagena y la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente de España. Se agradece la financiación recibida, así como los datos suministrados.

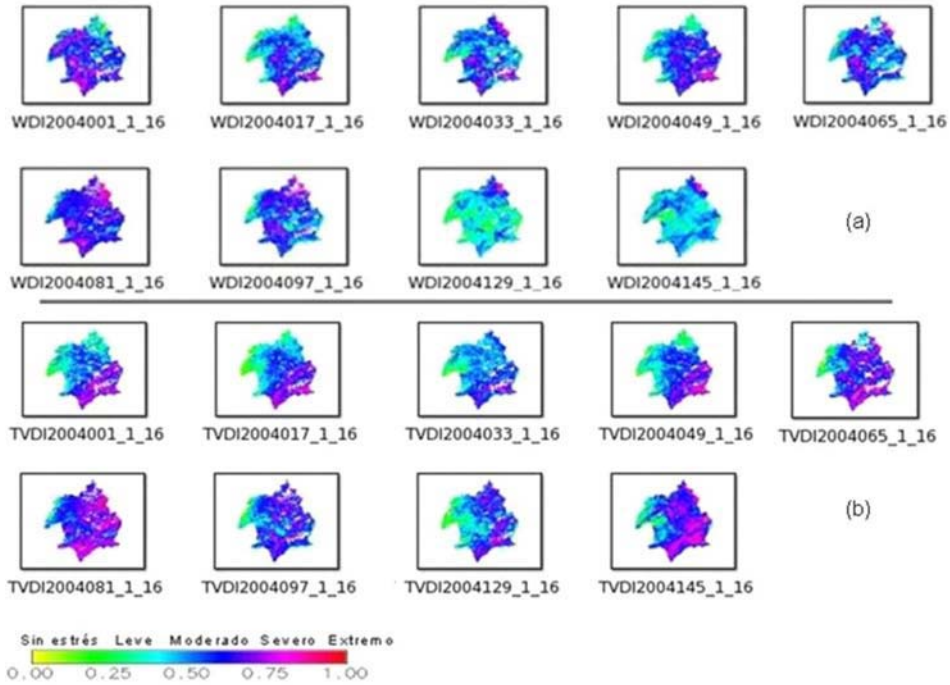


Fig. 5. Evolución de mapas de: (a) WDI y (b) TVDI. Período 01/01/04 a 08/06/04

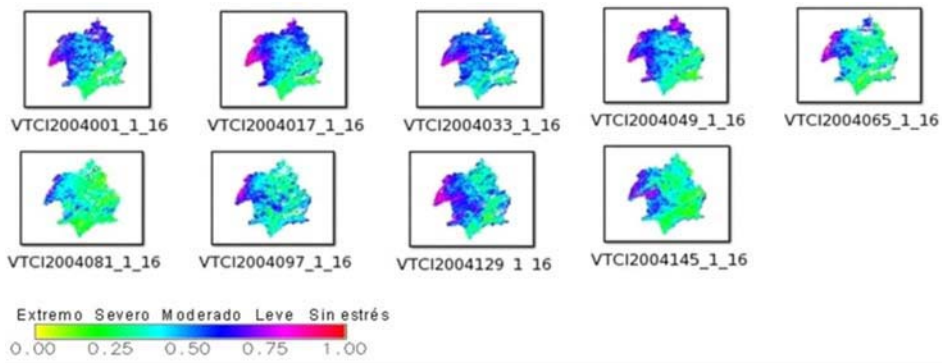


Fig. 6. Evolución de mapas de VTCI. Período 01/01/04 a 08/06/04



Fig. 7. Evolución de mapas de SPI escala mensual Años 2004-2005