



Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana

Utilization of surface temperature and enhanced vegetation Index images for the study of hydric conditions on Pampa region

Holzman, Mauro ¹ ✉ - Rivas, Raúl ^{1,2} - Piccolo, María Cintia ^{3,4}

Recibido: 28 de Junio de 2011 • Aceptado: 08 de Marzo 2012

Resumen

En este trabajo se avalúan los efectos de dos eventos ENOS en la disponibilidad de agua en el suelo de la región pampeana argentina-uruguaya a través del índice Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI). En 3 áreas no cultivadas, ubicadas en las provincias de La Pampa y Buenos Aires en Argentina y en el departamento de Maldonado en Uruguay se analizaron imágenes satelitales del sensor MODIS de temperatura de superficie (LST) e índice de vegetación mejorado (EVI), composición de 8 y 16 días respectivamente, de 67,75 ha de resolución. Los períodos de análisis fueron seleccionados a partir del índice Niño 3.4 de anomalías de temperatura de la superficie del mar y comprendieron los meses de agosto-febrero de 2007-2008 (La Niña) y 2009-2010 (El Niño). El EVI mostró valores más bajos en la provincia de Buenos Aires y en Uruguay para el periodo 2007-2008 que en 2009-2010, a partir de octubre-noviembre; la LST fue menor en Uruguay para el periodo 2009-2010 que en 2007-2008. El TVDI mostró una leve tendencia a condiciones de menor disponibilidad de agua en el suelo en Uruguay durante la etapa madura de La Niña. Se propone al TVDI como una herramienta para evaluar las teleconexiones de ENOS en la disponibilidad de agua en el suelo de la región pampeana, con el potencial de ampliar su utilización en el estudio, planificación y gestión de múltiples actividades o aspectos relacionados con el ciclo hidrológico a escala regional.

Palabras clave: ENSO, TVDI, LST, EVI.

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA - CIC - Municipalidad de Azul) - República de Italia 780 (B7300), Azul, Buenos Aires, Argentina.

✉ mauroh@faa.unicen.edu.ar

² Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires

³ Instituto Argentino de Oceanografía, Camino la Carrindanga km 7 (B8000), Bahía Blanca, Argentina

⁴ Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

Abstract

The effects of two ENSO events on soil moisture of the Pampa Region of Argentina and Uruguay through the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) are evaluated. In 3 uncultivated areas of La Pampa and Buenos Aires provinces in

Argentina and Maldonado department in Uruguay, satellite images from the sensor MODIS of LST (Surface Temperature) and EVI (Enhanced Vegetation Index), composition of 8 and 16 days respectively and 67,75 ha resolution were analyzed. The analyzed periods were selected considering the Niño 3.4 index of Sea Surface Temperature anomalies which correspond to August-February 2007-2008 (La Niña event) and 2009-2010 (El Niño event). EVI showed lower values in Buenos Aires province and Uruguay for the 2007-2008 period from October-November than 2009-2010 period; LST was lower in Uruguay for 2009-2010 period than 2007-2008 period. TVDI showed a slight trend to lower water availability before weakening La Niña. TVDI as a tool to evaluate ENSO teleconnections on soil water availability on Pampa Region is proposed, with potential application in research, planning and management of several aspects related to hydrological cycle at regional scale.

Keywords: ENSO, TVDI, LST, EVI.

INTRODUCCIÓN

Aunque en la región pampeana se han observado incrementos en la producción agropecuaria a partir de la década de 1980 (Viglizzo *et al.* 2004), los excesos o déficits de agua ejercen limitaciones para la producción en secano. A su vez, estas fluctuaciones hídricas tienen la potencialidad de afectar diversas actividades humanas como es la generación de energía hidroeléctrica, entre otras. Específicamente la variabilidad interanual en las precipitaciones en el sureste de Sudamérica ha sido frecuentemente asociada a El Niño Oscilación Sur (ENOS), con valores superiores a lo normal durante El Niño y escasez en La Niña. Scian (2000), analizó la relación entre dos índices de ENOS, el Índice de Oscilación del Sur (SOI), las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) y la variabilidad de las precipitaciones en el centro-oeste de la pradera pampeana. Encontró que las correlaciones espaciales más fuertes ocurrían al final de la primavera y comienzos del verano. A su vez, otros autores como Compagnucci y Agosta (2008) encontraron que no hay vinculación entre las anomalías de SST del Pacífico ecuatorial y la precipitación en el centro-oeste de Argentina. Boulanger *et al.* (2004), estudiando las teleconexiones de ENOS en las precipitaciones sobre la cuenca del Paraná-Plata en los últimos 50 años, hallaron que hay desplazamientos de los patrones espaciales de teleconexión entre un evento y otro, impidiendo la definición de una relación estadística robusta entre ENOS y la variabilidad de las precipitaciones.

Por otro lado, en las últimas tres décadas la teledetección ha contribuido a mejorar el conocimiento de la variabilidad de diversos procesos hidrológicos, climáticos y ecológicos (Poveda y Salazar 2004). Dicha herramienta ha sido aplicada recientemente en la región pampeana en estudios de diversa temática, desde la hidrología a la producción agrícola (Rivas *et al.* 2011). Además, algunos autores (Asner y Townsend 2000; Kogan y Wei 2000; Poveda *et al.* 2001) han analizado la relación entre ENOS y las condiciones de la vegetación en el sur de Sudamérica, a través de imágenes satelitales. Kogan y Wei (2000) con imágenes del satélite NOAA compararon la condición de la vegetación durante 4 eventos El Niño y La Niña en todo el mundo. Hallaron una zona de elevada correlación en el centro-este de Argentina. En la fase temprana del evento las diferencias en las condiciones de la vegetación serían mínimas, con posterior deterioro durante La Niña y de mejora en El Niño en las fases maduras del fenómeno (agosto a febrero).

La información que brindan los sensores a bordo de satélites en la región térmica del espectro electromagnético complementada con la del Visible e Infrarrojo cercano ha sido utilizada (Goward *et al.* 1985; Nemani *et al.* 1993; Moran *et al.* 1994; Sandholt 2002; Rivas y Houspanossian 2006; Han *et al.*

2010) para inferir el estado hídrico de la vegetación y el suelo conjuntamente, posibilitando el estudio de áreas parcialmente vegetadas. La primera combinación que mostró aptitud en reflejar la condición de humedad del suelo fue la relación LST/NDVI (Temperatura de Superficie/Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Nemani *et al.* (1993), calculando la pendiente de dicha relación para diferentes áreas, encontraron que está asociada a las condiciones de humedad del suelo. A su vez, brinda información sobre la resistencia de la cubierta vegetal y la posibilidad de estudiar la interacción superficie-atmósfera. Posteriormente, Moran *et al.* (1994), basándose en el método LST/NDVI y en el índice Crop Water Stress Index, desarrollaron el índice Water Deficit Index (WDI). El WDI se sustenta en la relación entre la diferencia de temperatura de la superficie y la del aire con el NDVI, permitiendo estimar la tasa de evapotranspiración y el déficit relativo de agua para superficies total y parcialmente cubiertas por vegetación.

Sandholt *et al.* (2002), desarrollaron el Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI). En este índice supone que gráficamente la dispersión de LST en función de NDVI tiene forma triangular. Luego el TVDI se puede estimar definiendo los límites húmedos y secos en el triángulo. Dichos autores estimaron este índice para la región norte de Senegal con imágenes NOAA-AVHRR y, comparándolo con la humedad superficial simulada del suelo, encontraron altas correlaciones ($R^2=0,70$) con patrones espaciales similares entre sí. Han *et al.* (2010) aplicaron el TVDI con imágenes producto de LST y NDVI del sensor MODIS sobre distintas cubiertas en la región Noroeste de China. Encontraron que este índice tiene aptitud para reflejar los cambios espaciales y temporales de humedad superficial del suelo, mostrando una alta concordancia ($R^2>0,70$) entre las estimaciones desde satélite y la humedad relativa del suelo medida en campo.

En este trabajo se propone evaluar preliminarmente a través de la relación entre LST y EVI (Índice de Vegetación Mejorado) si los cambios en las condiciones hídricas de superficie en la región pampeana argentina-uruguaya en dos primaveras y veranos están influenciados por los eventos ENSO.

METODOLOGÍA

El análisis de LST y EVI se realizó mediante el uso de productos MOD11 (Land Surface Temperature and Emissivity), composición de 8 días y MOD13 (Gridded Vegetation Index), composición de 16 días, correspondientes al sensor AQUA/MODIS (<http://wist.echo.nasa.gov>). Las imágenes fueron procesadas con el software ENVI y proyectadas a coordenadas Geográficas (Lat/Long), Datum WGS84. Luego se realizó un recorte de la región pampeana y se armaron los pares de imágenes de LST

y de EVI de un mismo periodo. Para equiparar los 16 días analizados en el producto MOD13, se computaron 2 imágenes del MOD11 para cada imagen de EVI, según la metodología de Han *et al.* (2010). Todas las imágenes procesadas tienen una resolución de 67,75 ha.

Las imágenes utilizadas en el análisis se seleccionaron tomando como referencia el índice Niño 3.4 (Figura 1) (<http://www.cpc.noaa.gov/data/indices>). El índice Niño 3.4 se define como la media de las anomalías de SST sobre un área rectangular limitada por: 5°N - 5°S y 170°O - 120°O. Este índice, considera como periodo El Niño o La Niña si las anomalías de SST en el área rectangular es mayor a +0,8 y menor a -0,8, respectivamente. Los valores de anomalías intermedios son considerados como periodo neutro (www.bom.gov.au). Tomando los límites anteriores como base, se seleccionaron los siguientes periodos que conforman 14 pares de imágenes LST/EVI:

- agosto-febrero 2007-2008 (periodo La Niña) y
- agosto-febrero 2009-2010 (periodo El Niño)

Áreas de Interés

En la región de estudio se seleccionaron 3 áreas de interés (AOI) correspondientes a zonas naturales o no cultivadas. Para evitar los posibles efectos antrópicos en la LST y EVI por el cultivo, con imágenes del satélite Landsat 5 se corroboró que las áreas permanecieron invariantes en el periodo considerado. Estas imágenes fueron corregidas espacialmente en base a los mosaicos ortorectificados de Landsat ETM+, GeoCover 2000, de 14,25 m de resolución espacial. Las AOI seleccionadas fueron 1 en la provincia de Buenos Aires (BA) y 1 en la provincia de La Pampa (LP), Argentina, y 1 en Uruguay (Ur) (Figura 2). La Figura 2 A muestra la ubicación de dichas AOI y, como ejemplo, la evolución temporal 2007 (Figura 2 B)-2010 (Figura 2 C) de la considerada en BA, correspondiente a Path 226 y Row 086. La caracterización de las mismas es la siguiente:

- AOI de provincia de La Pampa (25.400 ha): está ubicada en un relieve suavemente ondulado por la

presencia de médanos. Los suelos predominantes son los Entisoles, con dominio de suelos Torriortent y Torripsament, poco estructurados, con texturas arenosas, drenaje excesivo y permeabilidad muy alta. El clima es templado semiárido, con precipitaciones medias anuales de 500 mm y déficit hídrico en primavera-verano. La vegetación es una formación leñosa alta de bosque caducifolio de variable densidad, dominada por *Prosopis caldenia* (Cano, 1980).

- AOI de provincia de Buenos Aires (30.800 ha): está incluida en una llanura deprimida, con presencia de bajos inundables. Los suelos son del orden de los Molisoles y Alfisoles, con un horizonte superficial menos desarrollado que en los primeros; también se encuentran hidromórficos con permeabilidad deficiente (Batista *et al.* 2005). Los suelos más comunes son los Natracuoles y Natralboles, con un horizonte arcilloso, baja permeabilidad y alto contenido en sales sódicas (Salazar Lea Plaza y Moscatelli 1989; Lavado 1992). El clima es templado sub-húmedo, comúnmente con exceso de lluvias en invierno y déficit en verano (Lemcoff 1992). La vegetación predominante es pastizal natural, presentando estepas gramíneas y praderas con distinta cobertura y altura de pastos y hierbas. En los suelos con un horizonte superficial profundo y bajo contenido de sales se desarrollan gramíneas altas, cercanas a 0.8 m y en los suelos poco profundos y más salinos, gramíneas más bajas y predominantemente halófilas.
- AOI de Uruguay (89.700 ha): se ubica en una planicie suavemente ondulada. Los suelos son predominantemente Molisoles, dominando Argiudol y en menor proporción Hapludol, ambos con buen desarrollo vertical. El clima es templado sub-húmedo a húmedo, con precipitaciones anuales de 1100mm. Durante el verano suelen ocurrir déficits hídricos. La vegetación es predominantemente pradera natural. En las márgenes de los cursos de agua se encuentra vegetación arbórea de monte ribereño, con cobertura media a densa.

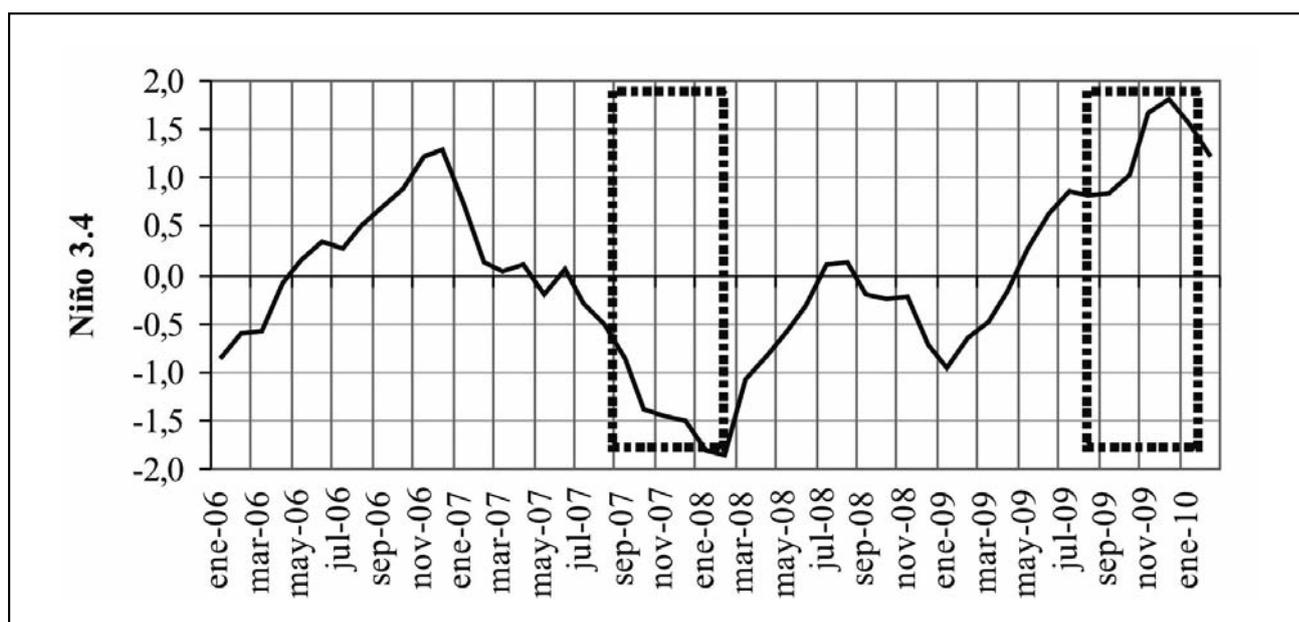


Figura 1. Índice Niño 3.4 de anomalías de temperatura enero 2006-enero 2010.

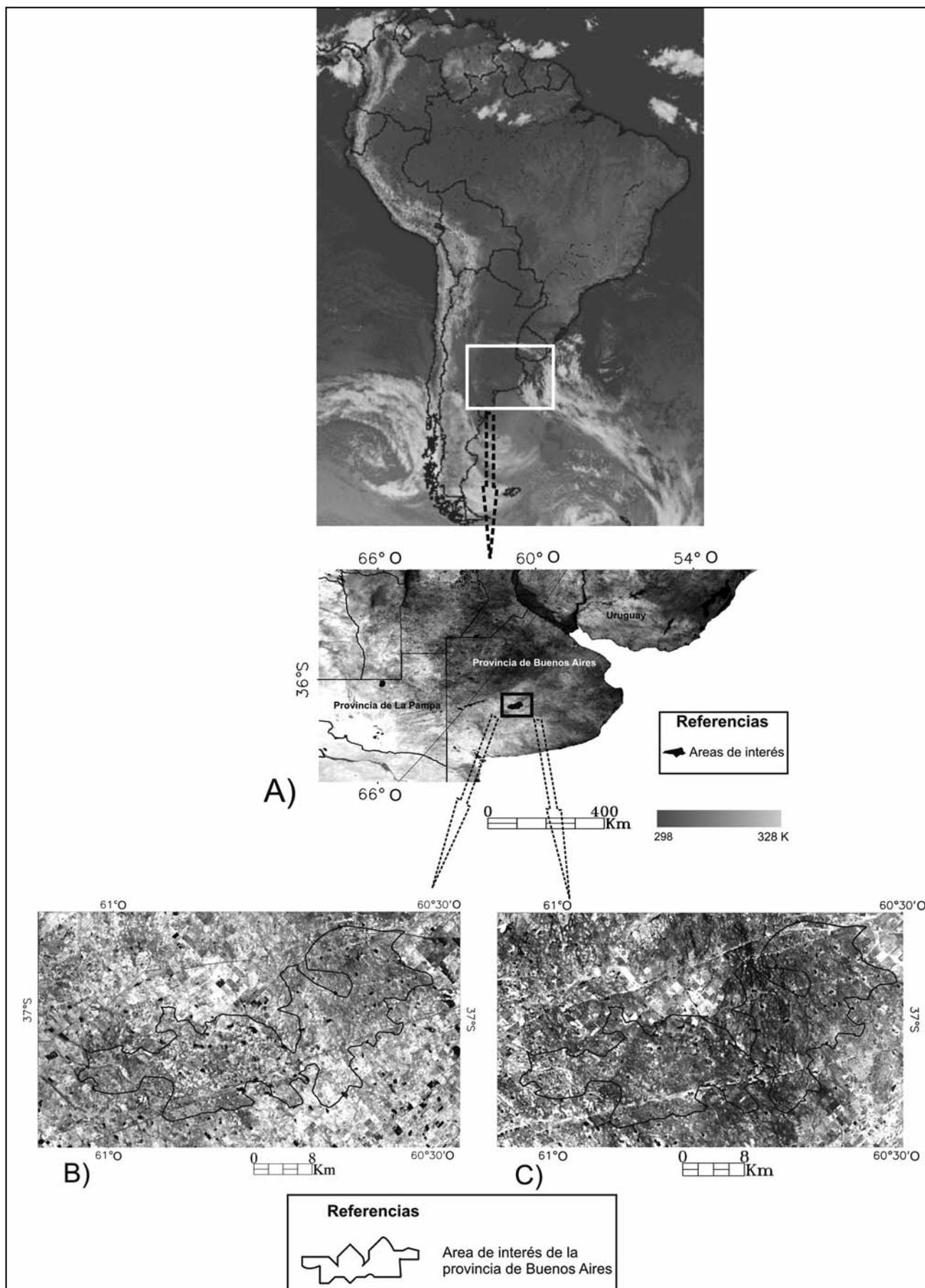


Figura 2. A) Ubicación de las AOI sobre una imagen de temperatura de superficie, B) imagen Landsat 5 del 21/07/2007, C) imagen Landsat 5 del 01/12/2010.

En menor proporción hay árboles muy dispersos alejados de los cursos de agua, característicos de la formación parque (Nin 1981).

Temperature Vegetation Dryness Index

El TVDI es un índice capaz de proveer información sobre el estado hídrico y energético de la superficie combinando la LST y NDVI y no es dependiente de datos complementarios a los obtenidos desde satélite. Mientras el NDVI brinda información sobre el estado de crecimiento y condición de la vegetación, la LST refleja la disponibilidad de humedad del suelo. El NDVI es un indicador conservativo del estrés hídrico, pues la vegetación se mantiene en buenas condiciones ante un estrés hídrico inicial; en cambio la LST puede aumentar rápidamente (Goetz 1997). La combinación de estas dos variables permite conocer la disponibilidad superficial de agua en el suelo.

Este índice está basado en el espacio de dispersión LST-NDVI. La relación entre estas dos variables generalmente muestra una fuerte correlación negativa (Gillies et al. 1997). Frecuentemente el diagrama de dispersión entre LST y los índices de vegetación muestran una forma triangular (Price, 1990, Carlson et al. 1995), si un amplio rango de cobertura de vegetación y de humedad del suelo está contenido en los datos (Figura 3). Así, el TVDI puede ser definido como (Sandholt et al., 2002):

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

donde LST es la temperatura (K) observada para un píxel dado; LST_{min} es la mínima temperatura de superficie en el triángulo y define el límite húmedo; $LST_{max} = a \times EVI + b$ es la máxima temperatura observada para un valor dado de EVI y a y b son parámetros de superficie propios de la imagen que

definen el límite seco como una relación lineal entre los datos (Figura 3).

En la Ecuación 1 utilizamos el índice EVI en vez de NDVI, originalmente propuesto por Sandholt et al. (2002), pues presenta ventajas con respecto al segundo por incorporar coeficientes que consideran el efecto de suelo en la señal captada por el satélite. Filtrando previamente los píxeles con agua y nubes en la imagen, se estimó el TVDI para cada mes con los valores de LST y EVI medios de cada AOI. Del diagrama de dispersión entre LST y EVI se extrajeron las máximas temperaturas para pequeños intervalos de EVI y luego el límite seco se calculó como una regresión lineal entre ambos. La LST_{min} fue estimada como el promedio de las temperaturas mínimas para los intervalos de EVI.

RESULTADOS

Al analizar los 14 pares de imágenes LST y EVI (Figura 4), se observó que los valores de EVI en LP en general fueron mayores en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, con valores entre 0,11 y 0,34. La LST no mostró una tendencia clara, con valores que oscilaron entre 293 y 319 K. En BA desde agosto a octubre el EVI fue mayor en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, con el comportamiento inverso en enero y febrero; los valores oscilaron entre 0,22 y 0,53. La LST fue similar en ambos eventos, siendo mayor en enero y febrero de 2008; los valores oscilaron entre 293,8 y 314,2 K. En Ur el EVI fue mayor en agosto y septiembre de 2007, con el comportamiento inverso de noviembre a febrero, con oscilaciones entre 0,27 y 0,63. La mayor parte de los meses la LST fue superior durante La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, oscilando los valores entre 290,7 y 317,5 K. En las tres AOI se observa una tendencia a mejores condiciones de la vegetación en agosto, septiembre y octubre de 2007 que en 2009; la LST en general fue menor en enero y febrero de 2010 que en 2008.

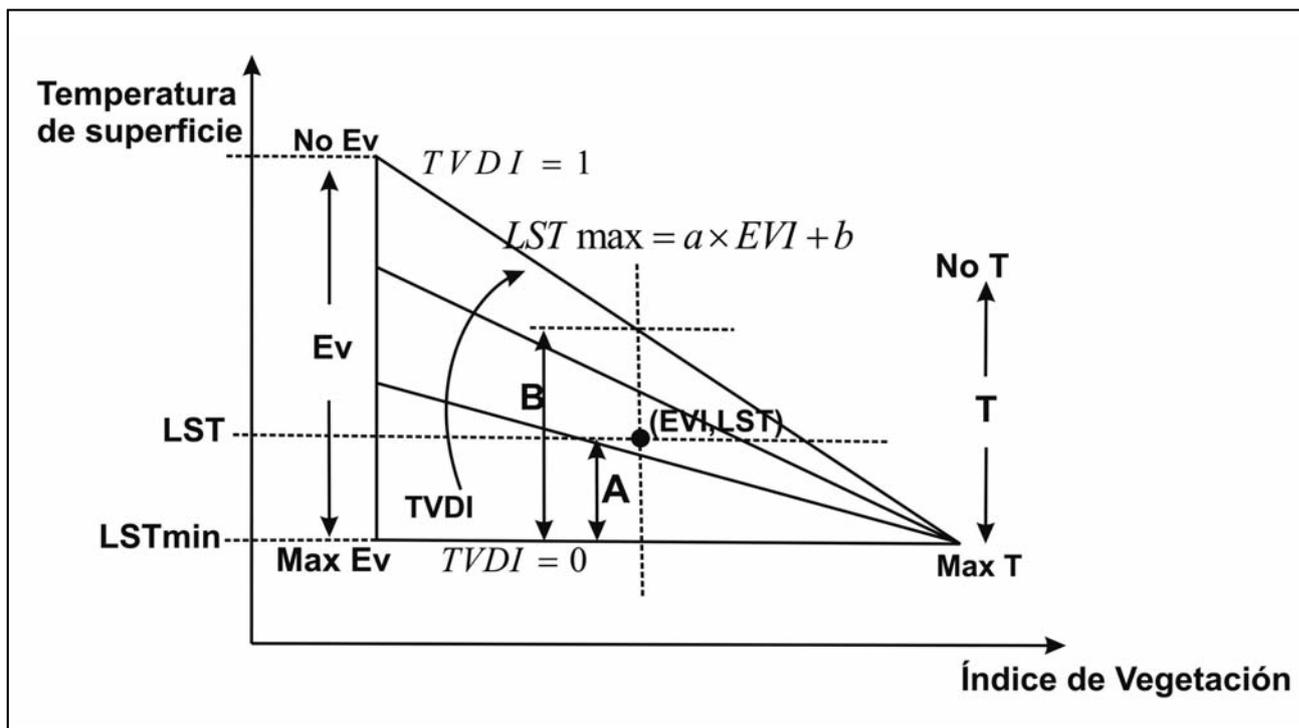


Figura 3. Definición del TVDI. Para un píxel dado (EVI, LST), el TVDI puede ser estimado como la proporción entre A y B (adaptado de Sandholt et al., 2002).

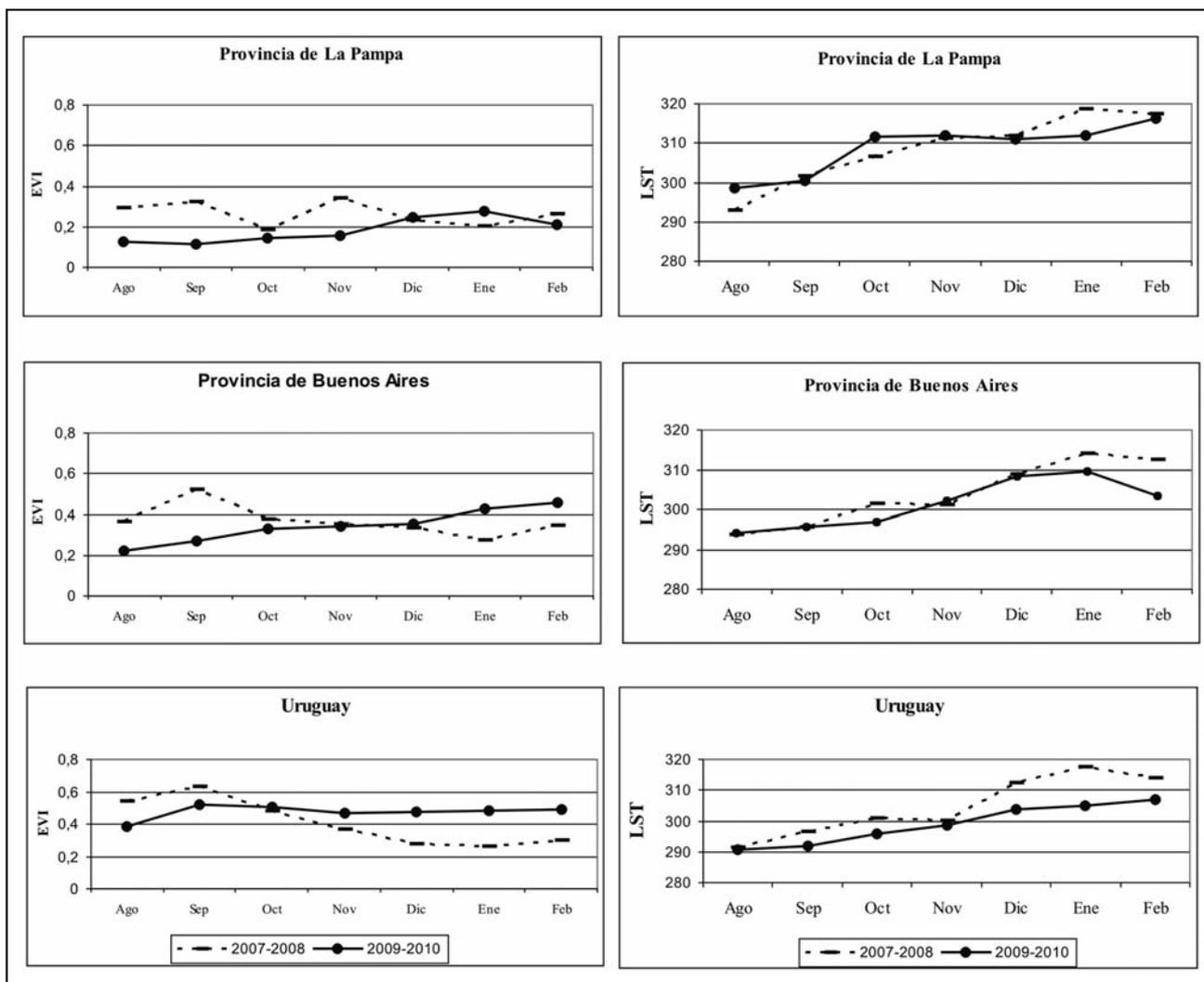


Figura 4. Valores medios de EVI y LST para las AOI analizadas.

De los gráficos de dispersión de LST en función de EVI se calcularon los límites secos y húmedos para cada mes. La Tabla 1 muestra los parámetros a y b de los límites secos y la Tabla 2, los parámetros de los límites húmedos calculados.

Los parámetros del límite seco para cada mes se muestran que el periodo 2007-2008 está caracterizado por una tendencia a LST máximas crecientes desde agosto a febrero, con descensos en octubre y febrero. El periodo 2009-2010 se caracterizó por LST máximas crecientes desde agosto a noviembre, con descensos en diciembre, enero y febrero. Coincidentemente con la bibliografía, se encontró una fuerte correlación negativa entre LST y EVI, con coeficientes de determinación que oscilan entre 0,88 y 0,99.

En el periodo 2007-2008 la LST_{min} se incrementó desde agosto a enero, con un descenso en febrero. En 2009-2010, se incrementó desde agosto a diciembre, con decrementos en enero y febrero. Para mostrar la evolución temporal del TVDI en las AOI y que esos resultados puedan ser comparables, se seleccionaron la LST_{max} de enero de 2007 ($LST_{max} = 34,59EVI + 333,4$) y la LST_{min} de agosto de 2007 (287,3 K) como límites extremos del triángulo. Considerando esos límites, con la Ecuación 1 se estimó el TVDI para cada mes en las tres AOI (Figura 5).

En la Figura 5 se observa que mes a mes hay una tendencia general a mayores valores de TVDI en LP que en BA y

Ur, de acuerdo al régimen de humedad semiárido a sub-húmedo ó húmedo, respectivamente. En la LP el TVDI mostró una tendencia a menores valores en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010 para los meses de agosto, octubre, noviembre y enero. En BA se observó un comportamiento similar en los meses de agosto, octubre, noviembre y febrero. Ur mostró un comportamiento algo diferente con valores en octubre, diciembre y febrero de El Niño menores a La Niña.

DISCUSIÓN

En las tres AOI analizadas se observó una tendencia a mejores condiciones en la vegetación (altos valores de EVI) de agosto a septiembre-octubre de 2007 que en 2009. Posteriormente, excepto en la provincia de La Pampa, estas condiciones mejoraron durante 2007-2008. Para este último periodo, el índice Niño 3.4 muestra valores menores a -1 a partir de octubre, marcando un evento La Niña. En 2009-2010, dicho índice toma valores superiores a +1 a partir de noviembre, marcando un evento El Niño. Como es frecuente en el fenómeno ENOS, los eventos La Niña y El Niño analizados comenzaron a desarrollarse a partir de otoño alcanzando su madurez en verano. Posiblemente los cambios observados en la vegetación estarían asociados a las teleconexiones de ENOS en la región pampeana.

Tabla 1. Parámetros obtenidos del límite seco y coeficientes de determinación para agosto-febrero de La Niña 2007-2008 y El Niño 2009-2010 (Holzman y Rivas 2011).

Meses	$LST \max(K)$ 2007-2008	$LST \max(K)$ 2009-2010
Agosto	$LST \max = -16,433EVI + 298,7$ $R^2 = 0,91$	$LST \max = -24,53EVI + 304,4$ $R^2 = 0,93$
Septiembre	$LST \max = -30,759EVI + 309,7$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -23,63EVI + 309,3$ $R^2 = 0,98$
Octubre	$LST \max = -14,806EVI + 307,5$ $R^2 = 0,88$	$LST \max = -34,34EVI + 319,8$ $R^2 = 0,97$
Noviembre	$LST \max = -21,904EVI + 317,5$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -38,8EVI + 330,4$ $R^2 = 0,97$
Diciembre	$LST \max = -22,545EVI + 321,7$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -26,8EVI + 326,4$ $R^2 = 0,96$
Enero	$LST \max = -34,59EVI + 333,4$ $R^2 = 0,98$	$LST \max = -29,47EVI + 327,8$ $R^2 = 0,99$
Febrero	$LST \max = -33,491EVI + 329,6$ $R^2 = 0,99$	$LST \max = -28,7EVI + 324,1$ $R^2 = 0,99$

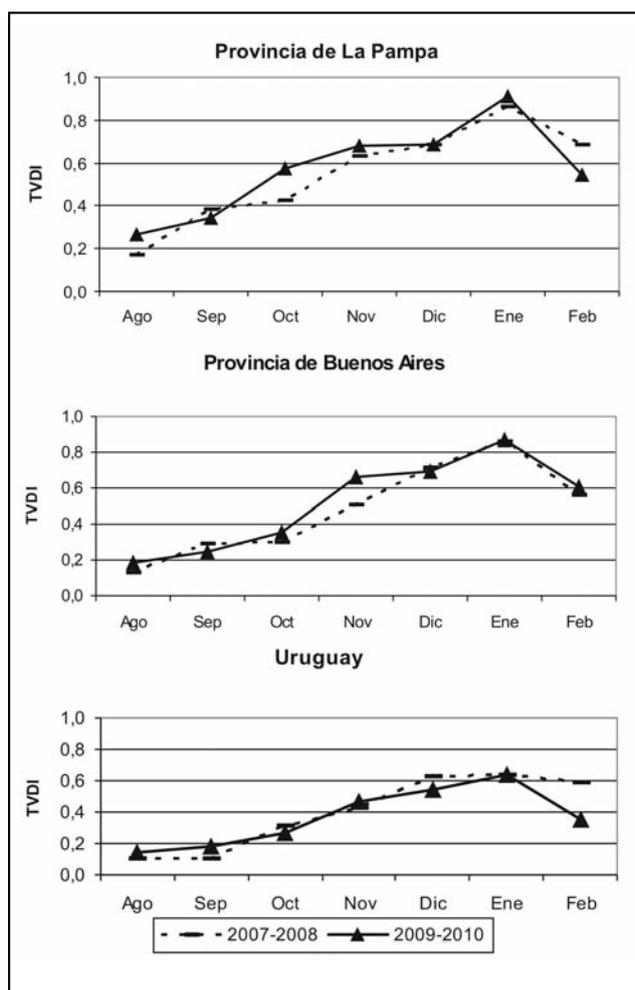


Figura 5. TVDI de agosto a febrero para las tres AOI analizadas.

Tabla 2. LST_{\min} obtenidas para agosto-febrero de La Niña 2007-2008 y El Niño 2009-2010 (Holzman y Rivas 2011).

Meses	$LST \min(K)$ 2007-2008	$LST \min(K)$ 2009-2010
Agosto	287,3	289,2
Septiembre	289,2	291,6
Octubre	292,2	294,2
Noviembre	296,6	297,9
Diciembre	300,0	305,8
Enero	301,2	301,7
Febrero	299,9	298,7

Observando la Figura 3, si durante El Niño hubo mejores condiciones hídricas que en La Niña, es esperable que las LST (Figura 4) fueran menores durante el primero, por la mayor disponibilidad de agua en el suelo para los procesos de transpiración y evaporación. La LST no mostró, en la escala de tiempo considerada, ese comportamiento diferencial que podría esperarse durante los dos eventos. Se observó tendencia a valores menores en El Niño sólo en Uruguay y en la provincia de Buenos Aires en enero y febrero.

Teniendo en cuenta que el TVDI engloba no sólo los cambios en el estado de la vegetación, sino los de la LST , siendo capaz de mostrar las consecuencias de una escasez hídrica reciente, se lo puede considerar como un indicador más adecuado de la disponibilidad de agua en el suelo que aquellas dos variables en forma aislada. Como se muestra en la Figura 5, en la mayor parte de los meses analizados, el TVDI indicó condiciones de menor disponibilidad de agua (valores altos de TVDI) durante El Niño que en La Niña en la provincia de La Pampa y Buenos Aires. Aun que en todos los meses las diferencias no

fueron muy marcadas, en Uruguay se observó una leve tendencia a mayores valores de TVDI en la etapa madura de La Niña que en El Niño.

Cabe preguntarse si la tendencia poco clara del TVDI en la provincia de La Pampa podría deberse a que el bosque de caldén es un ecosistema con mayor resiliencia frente a cambios importantes en las condiciones hídricas que los pastizales de la provincia de Buenos Aires y Uruguay, por lo que no estaría mostrando rápidamente esos cambios. Por otro lado, las condiciones desde el punto de vista hidrológico (tipos de suelos, precipitaciones, tipo de vegetación) en Buenos Aires son similares a las de Uruguay, por lo que el comportamiento diferente observado en el TVDI en estas áreas de interés podrían atribuirse a la mayor influencia de ENOS en Uruguay. No obstante, es necesario hacer un análisis de más eventos ENOS e investigar el comportamiento temporal de estas áreas durante esos eventos. Cabe destacar que el presente trabajo se centró en el estudio de sistemas naturales; en el futuro sería conveniente el análisis del comportamiento de la Temperatura de Superficie y del Índice de Vegetación Mejorado en las áreas cultivadas en relación a ENOS.

CONCLUSIONES

La influencia de dos eventos ENOS en las condiciones hídricas de superficie en la región pampeana fue estudiada a través de imágenes satelitales productos del sensor MODIS de

Temperatura de Superficie e Índice de Vegetación Mejorado para las primaveras y veranos de los periodos 2007-2008 y 2009-2010.

El índice TVDI se presenta como una herramienta para evaluar las teleconexiones de ENOS en las condiciones hídricas de superficie en la región estudiada. Mediante este índice, no se evidenció la tendencia que podría esperarse sobre mayor disponibilidad de agua en el suelo en las áreas naturales analizadas durante El Niño respecto a La Niña, excepto en Uruguay. Es imprescindible realizar un estudio de más eventos ENOS para confirmar las tendencias del TVDI observadas en las tres zonas consideradas, como así también conocer el patrón espacial de dicho índice en las zonas cultivadas de la región. El índice podría ser utilizado para conocer la distribución espacial de las condiciones hídricas de superficie y su relación con otros componentes del ciclo hidrológico, como así también servir de apoyo para la planificación y gestión de múltiples actividades como la de grandes obras hidráulicas y la gestión de riesgos de sequía e inundación, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PRH 0032), a la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) y a la CIC por los fondos otorgados para el desarrollo de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASNER, G.P. Y A.R. TOWNSEND, 2000.
Satellite observations of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. *Geophysical Research Letters*. Volumen 27: 981-984.
- BATISTA B.W; M.A. TABOADA; R.S. LAVADO; S.B. PERELMAN Y R.J.C. LEÓN, 2005.
Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. *En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas-Un homenaje a J.C. León (editores Oesterhled M; M.R. Aguiar; C.M. Ghersa y J.M. Paruelo). Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Argentina. 113-129.*
- BOULANGER, J.P.; J. LELOUP; O. PENALBA; M. RUSTICUCCI.; F. LAFON Y W. VARGAS, 2005.
Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics*. Volumen 24: 393-413.
- CANO, E., 1980.
Inventario Integrado de los Recursos Naturales de La Pampa. *INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam Buenos Aires, 493 pp. Argentina.*
- CARLSON, T.N.; R.R. GILLIES Y T.J. SCHMUGGE, 1995.
An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil-water content. *Agricultural and Forest Meteorology*. Volumen 77: 191-205.
- COMPAGNUCCI, R.H Y E. A. AGOSTA, 2008
La precipitación de verano en el centro-oeste de Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (ENOS) e interdecádico "tipo" ENOS. *GEOACTA*. Volumen 33: 107-114.
- GILLIES, R.R.; W.P. KUSTAS Y K.S. HUMES, 1997.
A verification of the "triangle" method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*. Volumen 18, 15: 3145-3166.
- GOETZ, S.J., 1997.
Multisensor Analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*. Volumen 18: 71-94.

- GOWARD S.N.; G. D. CRUICKHANKS Y A. S. HOPE, 1985.
Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape.
Remote Sensing of Environment. Volumen 18, 2: 137-146.
- HANG Y.; Y. WANG Y Y. ZHAO, 2010.
Estimating soil moisture conditions of the Greater Changbai Mountains by Land Surface Temperature and NDVI.
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Volumen 48, 6: 2509-2515.
- HOLZMAN M.E. Y R.E. RIVAS, 2011.
ENSO effects on hydric conditions of Pampa Region: a preliminary evaluation using LST and EVI.
XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasil.
- KOGAN, F. N. Y G. WEI, 2000.
Using AVHRR for detection of El Niño/La Niña impacts in land ecosystems.
Remote Sensing and Environmental. Volumen 26: 1165-1168.
- LAVADO, R.S., 1992.
Río de La Plata Grassland. Soils.
En: Coupland, (Ed. R.T.). Ecosystems of the World 8A : Natural Grasslands, Elsevier. Amsterdam. 377-380.
- LEMCOFF, J.H., 1992.
Río de La Plata Grasslands. Climate.
En: Coupland, (Ed. R.T.). Ecosystems of the World 8A: Natural Grasslands, Elsevier. Amsterdam. 376-377.
- MORAN M.S.; T.R. CLARKE; Y. INOUE Y A. VIDAL, 1994.
Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index.
Remote Sensing of Environment. Volumen 49, 3: 246-263.
- NEMANI, R., PIERCE, L., RUNNING, S. Y GOWARD, S.N., 1993.
Developing satellite-derived estimates of surface moisture status.
Journal of Applied Meteorology. Volumen 32, 3: 548-557.
- NIN, R., 1981.
Un estudio de los árboles y arbustos nativos de las márgenes del Río Yí desde el Paso San Borjas hasta la desembocadura del arroyo Maciel.
Tesis ingeniería agronómica, Facultad de Agronomía, 63 pp. Montevideo.
- POVEDA, G.; A. JARAMILLO; M.T. GIL; N. QUICENO Y R.I. MANTILLA, 2001.
Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture and vegetation index in Colombia.
Water Resources Research. Volumen 37: 2169-2178.
- POVEDA, G. Y L.F. SALAZAR, 2004.
Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia.
Remote Sensing of Environment. Volumen 93: 391-401.
- PRICE, J.C., 1990.
Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration.
Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Volumen 28: 940-948.
- RIVAS, R.; F. CARMONA Y D. OCAMPO, 2011.
Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana.
Editorial Martín, 125 pp. Argentina.
- RIVAS, R. Y J. HOUSPANOSSIAN, 2006.
Obtención de mapas de estrés hídrico a partir de datos captados por los sensores AVHRR y MODIS.
VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Paraguay.
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C. Y G. MOSCATELLI, 1989.
Mapa de suelos de la Pcia. De Buenos Aires.
SAGyP-INTA, 525 pp. Buenos Aires.
- SANDHOLT I.; K. RASMUSSEN; J. ANDERSEN, 2002.
A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status.
Remote Sensing and Environmental. Volumen 79, 2-3: 213-224.
- SCIAN, B., 2000.
Episodios ENSO y su relación con las anomalías de precipitación en la pradera pampeana.
GEOACTA Volumen 25: 100-113.
- WAN, Z., 1999.
MODIS Land Surface Temperature-Algorithm theoretical basis document.
(http://modis.gsfc.nasa.gov)
- VIGLIZZO, E.F.; A.J. PORDOMINGO, M.G. CASTRO; F.A. LÉRTORA Y J.N. BERNARDOS, 2004.
Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina.
Agriculture, Ecosystems and Environment. Volumen 101: 39-51.