

Análisis de condicionantes ambientales del estrés hídrico de la vegetación en el sur de Brasil mediante imágenes NOAA - AVHRR

L. E. Pertovt⁽¹⁾, R. Rivas⁽²⁾⁽³⁾, Schirmbeck Juliano⁽²⁾, W. Coelho Osmar Gustavo⁽¹⁾ y L. Vives⁽²⁾

(1) Geoprin. Avda. de Burgos, 12. 28036 Madrid.
E-mail: adiaz@geoprin.es

(1) Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS Programa de Pós Graduação em Geologia
Av. Unisinos, 950, Bairro Cristo Rei - CEP 93.022-000, São Leopoldo (RS), BRASIL.

(2) Instituto de Hidrología de Llanuras. CC 44, B7300, Azul, Buenos Aires, Argentina.

(3) Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

Se presentan los primeros resultados de la utilización del *Temperature Vegetation Dryness Index* -TVDI (Sandholt *et al.*, 2002) para evaluación de las condicionantes ambientales del estrés hídrico de la vegetación en la cuenca hidrográfica del río dos Sinos - Brasil. El TVDI se calcula a partir de información captada desde satélite y se sustenta en la temperatura de superficie (Ts) y en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los valores de TVDI obtenidos se calcularon a partir de imágenes captadas por el sensor AVHRR de la serie NOAA y fueron analizados con respecto a la precipitación mensual, comprobándose la ocurrencia de límites naturales de estrés hídrico de la vegetación relacionados a las precipitaciones. El TVDI muestra en general una gran variación entre invierno y verano, existiendo sitios de poca o nula variación del estrés a lo largo del año.

Palabras clave: condicionantes ambientales, estrés hídrico de la vegetación, teledetección, temperatura radiativa

Regional Drought using the Vegetation Condition Index from NOAA-AVHRR Satellite Measurements in the south Brazil

ABSTRACT

Preliminary results on the use of the Temperature Vegetation Dryness Index - TVDI (Sandholt et al., 2002) for assessing the environmental determining factor of vegetation water stress in the rio Dos Sinos basin -Brazil- are presented. The TVDI is estimated from information captured by satellites, and is based on the surface temperature (Ts) and the normalized difference vegetation index (NDVI). The obtained TVDI values were calculated from images of the AVHRR sensor, NOANN series, and were analyzed with respect to the monthly precipitation, and it was found that there were natural boundaries of water stress related to rainfall. The TVDI shows a great deal of variation between winter and summer, whereas some places display slight or null variations along the year.

Key words: environmental issues, hydric stress in vegetation, radiative temperature, remote sensing

Introducción

Entre las aplicaciones actuales del monitoreo ambiental, mediante técnicas de teledetección, se encuentran las orientadas al estudio de la cubierta vegetal, modelos de balance de energía y masa, estimación de la temperatura de superficie (Ts) y de la humedad del suelo (Hs), (Moran *et al.*, 1989; Valor y Caselles, 1996; Allen *et al.*, 1998; Sandholt *et al.*, 2002; Boken *et al.*, 2004; Rivas y Caselles, 2004,

Schirmbeck, 2005; Coll *et al.*, 2005; Verstraeten *et al.*, 2006).

Algunos de estos parámetros pueden ser directamente determinados a partir de los valores contenidos en las imágenes, mediante la combinación de registros en el rango visible (V), infra-rojo cercano (NIR) y térmico (TIR) del espectro electromagnético (Figura 1). Uno de estos parámetros es el estado hídrico de la cubierta vegetal. La obtención rápida y sencilla de mapas mostrando las condiciones hídricas

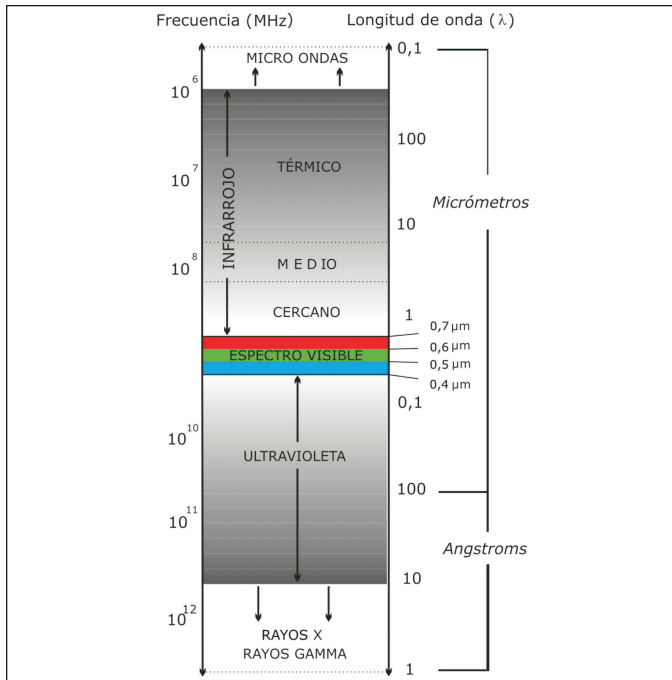


Fig. 1. Esquema representativo del espectro electromagnético
Fig. 1. Schematic representation of electromagnetic spectrum

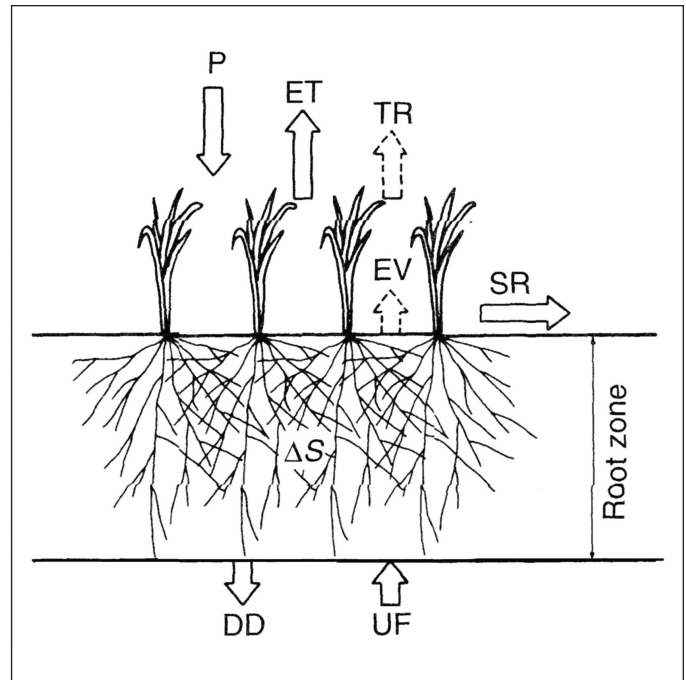


Fig. 2. Sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera (tomado de Miyazaki, 2006). Símbolos definidos en el texto
Fig. 2. Soil-vegetation-atmosphere system (from Miyazaki, 2006)

de la vegetación, así como sus variaciones temporales, resulta fundamental a los estudios ambientales, agronómicos e hidrogeológicos.

El objetivo del presente trabajo es analizar la distribución espacial del estrés hídrico a partir de datos captados desde satélite utilizando un índice sustentado en la temperatura radiativa y en la proporción de vegetación. A continuación se presentan los resultados del cálculo e interpretaciones preliminares del comportamiento del *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI), obtenido mediante imágenes captadas por el sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo de la serie de satélites de la *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), y sus relaciones con el sistema suelo-vegetación en la cuenca del río dos Sinos, Río Grande do Sul - Brasil.

Fundamentación teórica

La hipótesis básica de investigación es la existencia de una interrelación mutua del sistema suelo-vegetación. Así, una vez que el balance hídrico a nivel del suelo (Figura 2) sufre considerable influencia de los cambios en la cobertura vegetal, estos mismos cambios en la vegetación pueden, a su vez, indicar indirectamente el estado hídrico del suelo.

El ingreso de agua al sistema ocurre con la precipitación (P) y el flujo ascendente de agua a través del suelo (UF, *upward flux*). La salida de agua está compuesta por el escurrimiento superficial (SR, *surface runoff*), la evaporación (EV), la transpiración (TR) y el drenaje subsuperficial (DD, *deep drainage*).

El proceso de evapotranspiración (ET), que es la suma de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la cubierta vegetal, es un agente de intercambio hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera, actuando la vegetación como compartimiento intermedio y el suelo como fuente de abastecimiento del sistema.

La ET estará determinada por la demanda evaporativa de la atmósfera, la cual es, por definición, la tasa de evaporación máxima posible desde una superficie de agua libre en las mismas condiciones (Miyazaki, 2006).

Una eventual escasez hídrica en el suelo se refleja en los procesos fisiológicos de la vegetación, la cual deja de atender la demanda evaporativa de la atmósfera. Períodos prolongados de Déficit Hídrico provocan el Estrés Hídrico (SH) de la vegetación, cuya respuesta ecofisiológica inmediata es el cerramiento de los estomas, como forma de evitar la reseca y muerte del tejido vegetal, convirtiéndose mientras tanto parte de la energía absorbida del sol en flujo de calor sensible. Este fenómeno es aquí utilizado para

detectar SH a través de las variaciones de Ts y su correlación con la cubierta vegetal y los posibles estados hídricos del suelo.

Método y técnicas

Las imágenes utilizadas fueron captadas por el sensor AVHRR de la serie NOAA, correspondiendo a recortes de escenas de 1 km² de resolución espacial en las bandas 1, 2, 4 y 5, cuyas longitudes espectrales son respectivamente 0,58 - 0,68 μm (R), 0,725 - 1,00 μm (NIR), 10,30 - 11,30 μm (TIR) y 11,50 - 12,50 μm (TIR).

Estimación del porcentaje de vegetación

El modelo para el cálculo del porcentaje de vegetación del suelo (Pv) es función del índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) mediante la propuesta de Rouse *et al.*(1974):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

donde R y NIR son respectivamente los valores de reflectancia en el Rojo y en el Infrarrojo cercano del espectro electromagnético.

El Pv fue calculado mediante la ecuación propuesta por Valor y Caselles (1996):

$$P_v = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right) - K \cdot \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_v}\right)} \quad (2)$$

donde $NDVI_s$ y $NDVI_v$ son, respectivamente, los valores de NDVI para suelo desnudo, y para la vegetación mas densa, mientras que el coeficiente adimensional K es obtenido con la ecuación:

$$K = \frac{NIR_v - R_v}{NIR_s - R_s} \quad (3)$$

donde R_v y NIR_v son respectivamente las reflectancias de la vegetación (v) en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. A su vez, R_s y NIR_s son respectivamente las reflectancias del suelo (s) en las mismas bandas.

Estimación de la temperatura de superficie

Para estimar la temperatura de la superficie (Ts) es necesario determinar la emisividad de la superficie. Ésta se obtuvo mediante la ecuación propuesta de Valor y Caselles (1996) sin considerar el término de cavidad (Kerdiles *et al.*, 1996):

$$\varepsilon = \varepsilon_v P + \varepsilon_s (1 - P_v) \quad (4)$$

donde ε_v y ε_s son respectivamente las emisividades de la vegetación, y del suelo desnudo, con las cuales, considerando el porcentaje de vegetación (P_v), se determina la emisividad del área analizada (ε). Para ε_v se ha considerado un valor de 0,985 y para ε_s un valor de 0,96.

Para estimar la T_s mediante a partir de las temperaturas de las bandas 4 y 5 se ha utilizado el algoritmo *split windows* propuesto por Coll y Caselles (1997):

$$T_s = T_4 + (1,34 + 0,39 * (T_4 - T_5)) * (T_4 - T_5) + 0,56 + \beta(\varepsilon) \quad (5)$$

donde: T_4 y T_5 son las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5, mientras $\beta(\varepsilon)$ es la función de emisividad de la superficie resultante de:

$$\beta(\varepsilon) = \alpha * (1 - \varepsilon) * \beta * \Delta \varepsilon \quad (6)$$

donde: α y β son coeficientes de corrección atmosférica, ε es la emisividad de todo el intervalo espectral 10,5 - 12,5 μm y $\Delta \varepsilon$ es la diferencia de emisividad entre los intervalos espectrales de las bandas 4 y 5.

Los coeficientes de corrección atmosférica α y β dependen del contenido de vapor de agua en la atmósfera (W), y fueron obtenidos mediante las ecuaciones 7 y 8 (Coll y Caselles, 1997):

$$\alpha = (b_4 - b_5) * [(1,34 + 0,39 * (T_4 - T_5))] * \tau_5(\theta) + b_4 \quad (7)$$

$$\beta = [(1,34 + 0,39 * (T_4 - T_5))] * \tau_5(\theta) * b_5 + (\alpha/2) \quad (8)$$

donde b_4 y b_5 son los coeficientes que relacionan la temperatura (T) y la humedad (W) de la atmósfera. $\tau_5(\theta)$ es la transmisividad de la atmósfera para la banda 5, la cual es función del ángulo de observación θ del sensor.

Los valores de b_4 , b_5 y $\tau_5(\theta)$ se lograron a partir de las funciones siguientes (Coll y Caselles, 1997):

$$b_4 = (0,198 + 0,167 * W) * T_4 - (6,23 * W - 10) \quad (9)$$

$$b_5 = (0,234 + 0,206 * W) * T_5 - (78,9 * W - 5) \quad (10)$$

$$\tau_5(\theta) = 1 - [k_5 * W / (\cos \theta)^{m_5}] \quad (11)$$

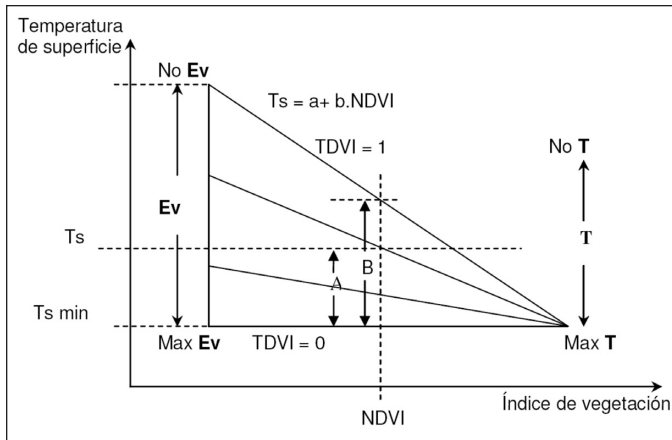


Fig. 3. Límites del triángulo Max Ev-Max T-No Ev (tomado de Rivas *et al.* 2005)
 Fig. 3. Max Ev-Max T-No Ev triangle limits. (from Rivas *et al.*, 2005)

donde k_s depende de la época del año, siendo $0,142 \text{ cm}^2/\text{g}$ en verano y $0,17 \text{ cm}^2/\text{g}$ en invierno, al igual que m_s (adimensional) que asume valores de $0,74$ en verano y $0,63$ en invierno.

Estimación del estrés hídrico

El SH, una vez logrados los mapas de T_s y NDVI, fue

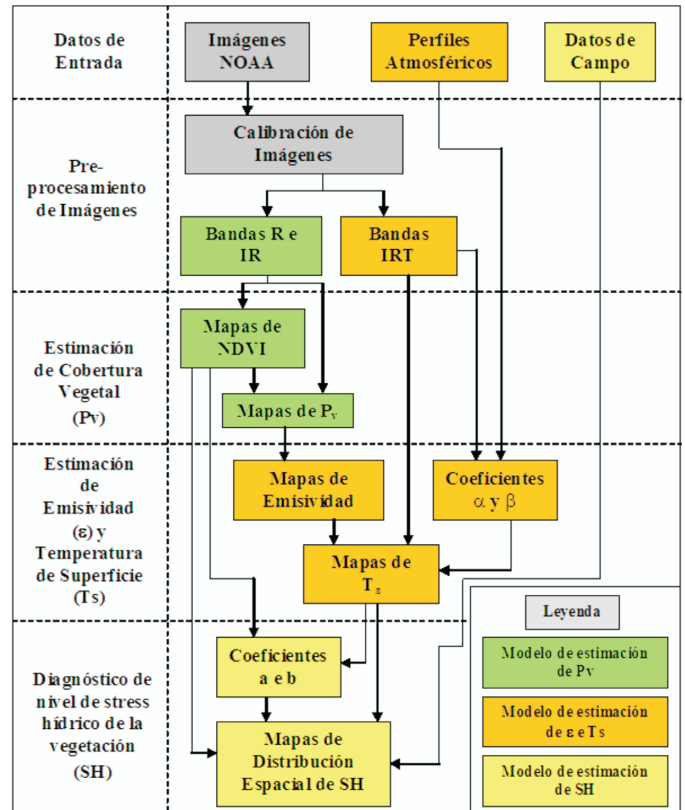


Fig. 5. Resumen de las etapas de investigación (Modificado de Schirmbeck 2005)
 Fig 5. Investigation stages (modified from Schimbeck, 2005)



Fig. 4. Ubicación de la estación meteorológica Campo Bom y el área de control (Area Teste) seleccionada
 Fig 4 . Location of test area and the Campo Bom Meteorological Station

estimado a partir del TVDI mediante la ecuación propuesta por Sandholt *et al.* (2002):

$$TVDI = \frac{(Ts - T_{smin})}{(a + b * NDVI - T_{smin})} \quad (12)$$

donde T_s es la temperatura radiativa del píxel (K), T_{smin} es la mínima temperatura de superficie en la imagen; "a" y "b" son parámetros calculados a partir de la relación existente en la imagen entre NDVI y T_s , y que define el triángulo (Figura 3) de vértices representados por la evaporación nula (No Ev) y la máxima transpiración (Max T) y evaporación, (Max Ev).

La línea que une Max T con No Ev define el límite seco, en el cual el valor del TDVI tiende a uno. La línea que une Max T con Max Ev determina el límite húmedo, en la cual el TDVI tiende a 0. El valor de TDVI para un píxel dado (NDVI, T_s) quedará determinado por la proporción entre las distancias A y B. Para un punto NDVI - T_s próximo al límite seco existirá en el suelo una mínima disponibilidad de agua. Para un punto cercano al límite húmedo existirá en el suelo una máxima disponibilidad de agua.

Una vez calculados los mapas de TVDI, se seleccionó un sector de 3x3 píxeles del área en la cual se encuentra emplazada la estación meteorológica Campo Bom, ubicada en la zona central del área de estudio y que dispone de datos de precipitaciones (PPT) para el año 2003. De este modo se considera que la estación esta incluida en el área de 9 km². La media de los 9 píxeles fue posteriormente contrastada con los valores de PPT mencionados.

Dado que esta área (Figura 4) se encuentra emplazada en una zona urbanizada, se escogió un segundo sector próximo a la estación (aproximadamente 5 km) como área de control, procurando evaluar el comportamiento de los datos en el espacio Ts - PPT.

El sector se ha seleccionado a partir de un análisis visual de las imágenes originales y un análisis cuantitativo de las imágenes de Ts, procurando escoger un sector libre del efecto de isla térmica debido a la influencia del área urbana.

En la Figura 5 se resumen los pasos seguidos hasta la obtención de los mapas de estrés hídrico.

Resultados y discusión

Para valorar la capacidad de detección de estrés a escala espacial y temporal se compararon los datos de PPT medias mensuales con los de TDVI obtenidos desde la imagen para el año 2003 para el área analizada.

La correlación derivada (Figura 6) muestra mayores diferencias de TVDI para situaciones de baja PPT mensual. Por el contrario, con el aumento de la PPT, los valores de TVDI tienden a disminuir y converger, definiendo un triángulo que estaría mostrando los umbrales naturales del estrés hídrico en la región bajo análisis.

Con esta interpretación, se presume que el umbral superior, para el cual TVDI tiende a uno para precipitación mensual nula, lo que coincide con el valor indicado por Rivas *et al.* (2005) como límite seco o de no evapotranspiración, estaría representando el estrés natural máximo del área. A su vez, el umbral inferior puede indicar la ocurrencia permanente de un nivel natural de stress hídrico del área, el cual no llega a las condiciones teóricas extremas de estrés nulo (TDVI tendiendo a 0) o de estrés máximo (TDVI tendiendo a 1).

Este comportamiento, se presume, podría estar condicionado por la diferencia entre el momento puntual de ocurrencia de la precipitación y el día de captura de la imagen, evidenciando la rápida variabilidad temporal del TVDI, y la necesidad de disponer de datos de precipitación a escala diaria para evaluar con mayor precisión dicha sensibilidad.

Los condicionantes ambientales de la ocurrencia de zonas con distintos niveles de estrés hídrico, para una misma precipitación mensual, todavía no son conocidos. Mientras tanto, ya se han verificado zonas con niveles permanentes de bajo estrés hídrico, lo que se puede observar en los mapas multitemporales de TVDI (Figura 7), además de zonas permanentes de

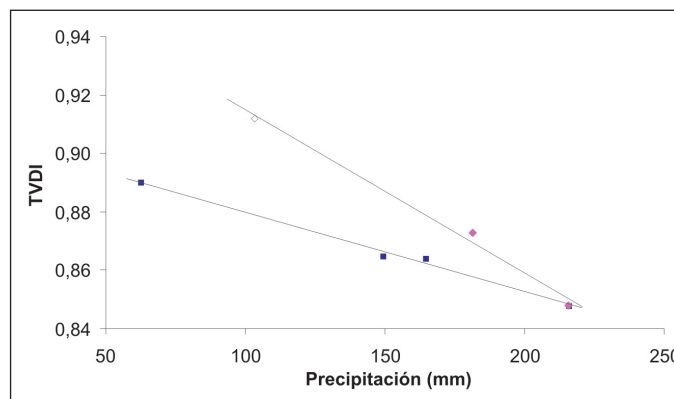


Fig. 6. Relación de TVDI con la PPT mensual medida en la estación Campo Bom

Fig 6. TVDI-PPT relations in Campo Bom Station

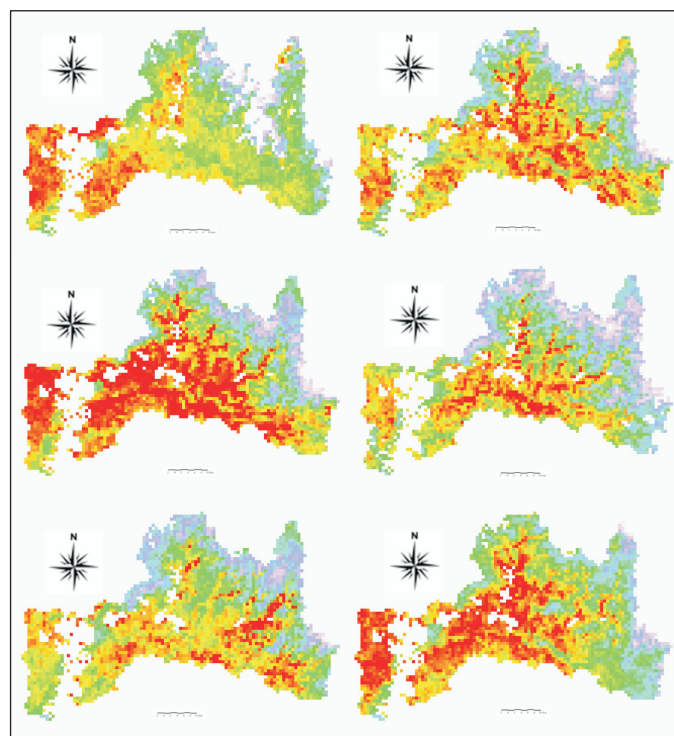


Fig. 7. Mapas de TVDI de la cuenca hidrográfica del río dos Sinos. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: 29/01, 11/04, 20/06, 20/08, 15/10 y 06/12 de 2003

Fig 7. TVDI Maps from Ríos dos Sinos Basin

elevado o bajo estrés, muestran una gran variación a lo largo del año, lo que estaría indicando una sensibilidad natural del área a las variaciones climáticas.

El área de estudio tiene una variación de altitud de entre 5 m y 1000 m sobre el nivel del mar, en la parte mas llana, de 5 m a 200 m (área sudoeste de la cuenca en la Figura 7), esta mas afectada por la actividad antrópica, áreas urbanas y agrícolas, lo que proporciona una mayor exposición del suelo y una disminución de la capacidad de retención de agua por lo cuál se detectan altos valores de TVDI.

En áreas de mayor pendiente predomina el bosque que proporciona al suelo una buena capacidad de retención de agua, además de la protección que hace del suelo (parte central de la cuenca en la Figura 7). El bosque no es sensible a las variaciones de la precipitación que puedan presentarse en las diferentes estaciones del año, por lo cual, en estas áreas se observan bajos valores de TVDI a lo largo de todo el año.

Otro factor que contribuye a la existencia de áreas no sensibles al cambio de la precipitación es la gran extensión de la red de drenaje, el área bajo riego y el afloramiento del SAG (centro y sur de la cuenca en la Figura 7).

Conclusiones

Las variaciones espaciales del TVDI a lo largo del año muestran contraste entre los meses de invierno y verano en las imágenes procesadas (Figura 7), lo que puede indicar la fragilidad del área al déficit pluviométrico.

Zonas de estrés hídrico permanentemente bajo o alto fueron detectadas, indicando que hay condiciones ambientales preponderantes con respecto al factor climático, lo que puede estar relacionado a la retención de humedad de los suelos o a zonas de aporte del Sistema Acuífero Guaraní.

Umbrales naturales de estrés hídrico fueron detectados, observándose una tendencia del umbral superior al valor TDVI = 1 para una precipitación mensual nula.

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, vol. 56.
Boken, V. K., Hoogenboom, G., Kogan, F. N., Hook, J. E.,

Thomas, D. L., Harrison, K. A. 2004. Potential of using NOAA-AVHRR data for estimating irrigated area to help solve an inter-state water dispute. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, 12: 2277-2286.
Coll, C., Caselles, V., Galve, J. M., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J. M., Rivas, R. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 288-300.
Coll, C., Caselles, V., 1997. A split window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, 14:16697-16713.
Kerdiles, H., Grondona, M., Rodriguez, R., Seguin, B., 1996. Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 157-182.
Miyazaki, T. 2006. *Water flow in soils*. 2d ed. Taylor & Francis.
Moran, M. S., Jackson, R. D., Raymond, L. H., Gay, L. W., Slater, P. N. 1989. Mapping surface energy balance components by combining Landsat Thematic Mapper and ground-based meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 30, 77-87.
Rivas, R., Caselles, V. A. 2004. Simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 6876.
Rivas, R., Weinzettel, P., Usunoff, E. 2005. Resultados preliminares de la estimación del estrés hídrico a partir de temperatura de superficie y NDVI. II Seminario Hispano - Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea - Relación aguas superficiales - aguas subterráneas, 195 - 202, Actas... Río Cuarto, Córdoba, 2005.
Rouse, J. W., Hass, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Austin: Texas A. M. University, College Station.
Sandholt, I., Rasmusen, K., Andersen, J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status, *Remote Sensing of Environment*, 79: 213-224.
Schirmbeck, J. 2005. Estimativa da evapotranspiração regional em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guaraní Vale do Rio dos Sinos RS: uma aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. 2005. 110 p. (551.573 S337e) Disertación (Maestrado en Geología). UNISINOS, São Leopoldo.
Valor, E., Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167-184.
Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., Van der Sande, C. J., Grootaers, I., Feyen J. 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment*, v. 101, 299-314, 2006.

Recibido: diciembre 2007

Aceptado: abril 2008