

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

Pertovt, Luis E.^a; Osmar Gustavo, Wöhl Coelho^a; Juliano, Schirmbeck^b; Rivas, Raúl^b

(a) 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.

(b) Instituto de Hidrología de Llanuras.

CC 44, B7300, Azul, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

Se presentan a seguir los primeros resultados de la utilización del *Temperature Vegetation Dryness Index* - TVDI (Sandholt et al., 2002) para evaluación de las condicionantes ambientales del stress hídrico de la vegetación en la cuenca hidrográfica del río dos Sinos - Brasil. Los valores de TVDI obtenidos fueron analizados con respecto a la precipitación mensual, comprobándose la ocurrencia de límites naturales de stress 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 stress a lo largo del año.

Palabras clave: Sensoramiento remoto, stress hídrico de la vegetación, condicionantes ambientales.

ABSTRACT

Are here showed the first results of the use of the *Temperature Vegetation Dryness Index* - TVDI (Sandholt et al., 2002) to evaluate of the environmental issues of hydric stress of the vegetation in the Sinos hydrographic river basin - Brazil. The obtained TVDI values were analyzed as a function of the monthly precipitation values, showing some natural thresholds related to the precipitation indexes. The TVDI highlighting in general a significant variation within summer and winter, existing sites of null or very low variation of the stress along the year.

Keywords: Remote Sensing, Vegetation Stress, environmental issues.

Introducción

Entre las aplicaciones actuales de monitoreo ambiental, mediante técnicas de sensoramiento remoto, encuéntrase las orientadas al estudio de la cubierta vegetal, modelos de balance de energía y del ciclo hidrológico, 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. 2000; Sandholt et al., 2002; Boken et al., 2004; Ferreira, 2004; Rivas y Caselles, 2004, Schirmbeck et al., 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 en longitudes de ondas termales (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 de la vegetación, así como sus variaciones temporales, resulta fundamental a los estudios ambientales, agronómicos e hidrogeológicos.

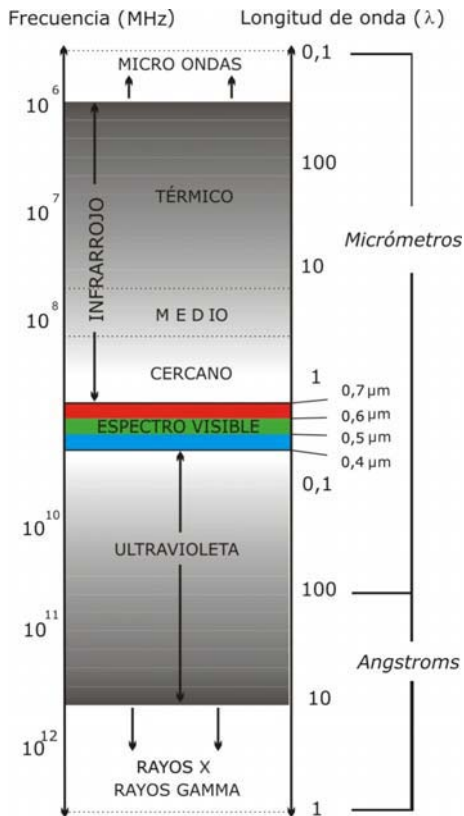


Fig. 1. Esquema representativo del espectro electromagnético.

Se presentan a continuación los resultados del cálculo e interpretaciones preliminares del comportamiento del TVDI, obtenido mediante imágenes de sensores AVHRR, 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.

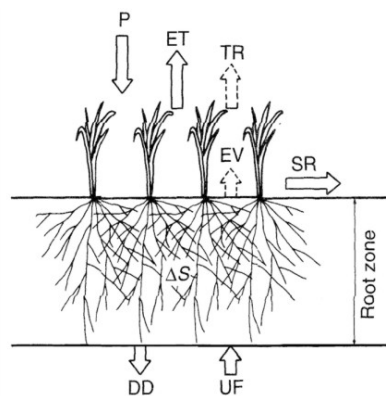


Fig. 2. Sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera (Miyazaki, 2006).

La ET potencial (ETP) 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 procesos fisiológicos de la vegetación, la cual deja de atender la demanda evaporativa de la atmósfera. Períodos prolongados de déficit hídrico (Hs) provocan el stress hídrico (SH) de la vegetación, cuya respuesta ecofisiológica inmediata es el cierre de los estomas, como forma de evitar la reseca y muerte del tejido vegetal, convirtiéndose mientras tanto parte de la energía absorbida del sol a la forma de calor. Este fenómeno es aquí utilizado para detectar SH a través de esas variaciones de Ts y su correlación con la cubierta vegetal y los posibles estados hídricos del suelo.

Método y técnicas

Las imágenes utilizadas fueran captadas por sensores AVHRR a bordo de satélites de la serie NOAA, correspondiendo a recortes de escenas con 1 km² de resolución espacial en las

bandas 1, 2, 4 y 5, cuyas longitudes espectrales son respectivamente 0,58 - 0,68µm (R), 0,725 - 1,00µm (NIR), 10,30 - 11,30µm (TIR) y 11,50 - 12,50µm (TIR).

Estimación de porcentual de cubierta vegetal

El modelo para el cálculo de porcentual de cobertura vegetal del suelo (Pv) parte de la obtención del índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) mediante la propuesta de Rouse et al. (1974):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

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

El porcentual de vegetación (PV) fue calculado mediante la propuesta de 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:

$$K = (NIR_v - R_v) / (NIR_s + R_s) \quad (3)$$

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

Estimación de temperatura de superficie

Para estimar la temperatura de la superficie (Ts) se hace necesario determinar la emisividad de la superficie. Lo que se obtuvo mediante la propuesta de Valor y Caselles (1996):

$$e = ev \cdot Pv + es \cdot (1 - Pv) \quad (4)$$

donde ev y es son respectivamente las emisividades de la vegetación, y del suelo desnudo, con las cuales, considerando el porcentual de vegetación (Pv), se determina la emisividad del área analizada (e).

Con los mapas de emisividad, se puede estimar Ts mediante el algoritmo Split Window, como propuesto por Coll y Caselles (1997):

$$T_s = T_4 + (1,34 + 0,39 \cdot (T_4 - T_5)) \cdot (T_4 - T_5) + 0,56 + b(e) \quad (5)$$

donde: T₄ y T₅ son las temperaturas de brillo en las bandas 4 y 5, mientras b(e) es la función de emisividad de la superficie resultante de:

$$b(e) = a \cdot (1 - e) \cdot b \cdot e \quad (6)$$

donde: a y b son coeficientes de corrección atmosférica, e es la emisividad de todo el intervalo espectral 10,3 - 12,5 mm y "e" es la diferencia de emisividad entre los intervalos espectrales de las bandas 4 (10,3-11,3 mm) y 5 (11,5-12,5 mm).

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

$$a = (b_4 - b_5) \cdot [(1,34 + 0,39 \cdot (T_4 - T_5)) \cdot t_5(q) + b_4] \quad (7)$$

$$b = [(1,34 + 0,39 \cdot (T_4 - T_5)) \cdot t_5(q) \cdot b_5 + (a/2)] \quad (8)$$

donde b₄ y b₅ son los coeficientes que relacionan la temperatura (T) y la humedad (W) de la atmósfera. Por su vez, t₅(q) es la transmisividad de la atmósfera para la banda 5, la cual es función del ángulo de observación q.

Los valores de b₄, b₅ y t₅(q) se obtienen mediante las ecuaciones de Coll & Caselles (1997):

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

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

$$t_5(q) = 1 - [k_5 \cdot W / (\cos q)^{m_5}] \quad (11)$$

donde k₅ depende de la época del año, asumiendo valores de 0,142 cm²/g en verano y 0,17 cm²/g en invierno, al igual que m₅ (adimensional) que asume valores de 0,74 en verano y 0,63 en invierno.

Estimación de stress hídrico

El SH, una vez obtenidos los mapas de Ts y NDVI, fue estimado a partir del *Temperature vegetation Dryness Index* (TVDI) mediante la propuesta de Sandholt et al. (2002):

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

donde Ts es la temperatura radiactiva de la superficie del píxel (k), Ts min 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 Ts, y que define el triángulo (Figura 3) de vértices representados por la evaporación nula (No Ev) y las máximas transpiración (Max T) y evaporación, (Max Ev).

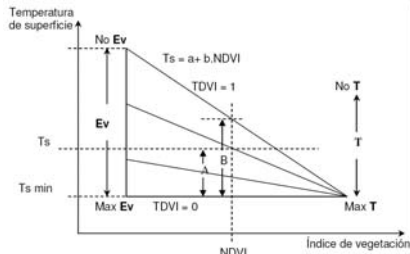


Fig. 3. Límites del TVDI (Rivas et al. 2005).

La línea que une Max T con No Ev define el límite seco, en el cual el valor del TVDI tiende a uno. La línea que une Max T con Max Ev determina el límite húmedo, en la cual el TVDI tiende a 0. El valor de TVDI para un píxel dado (NDVI, Ts) quedará determinado por la proporción entre las distancias A y B.

Para un punto NDVI -Ts 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 de la ciudad de Campo Bom, ubicada en la zona central del área de estudio y que dispone de datos de precipitaciones (PPT) para el año 2003, eligiendo como píxel central del sector seleccionado aquel que contiene a la estación.

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 análisis, procurando evaluar el comportamiento de los datos en el espacio Ts - PPT.



Fig. 4. Recorte de una imagen del área de emplazamiento de la estación meteorológica y el área de análisis seleccionada.

El sector se seleccionó 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 de la zona urbana.

En la Figura 5 se puede observar la secuencia lógica de las etapas desarrolladas.

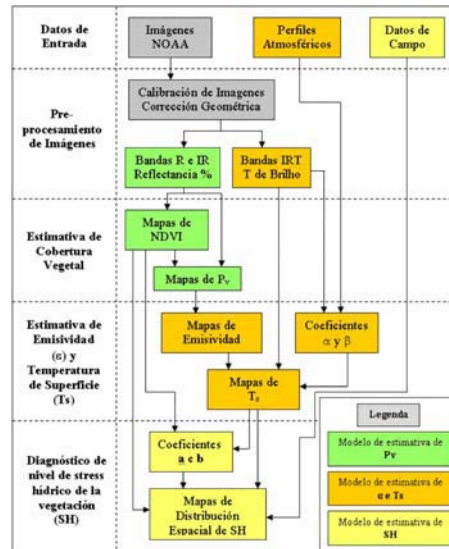


Fig. 5. Resumen de las etapas de investigación (Modificado de Schirmbeck 2005).

Resultados y discusión

Ante la no disponibilidad de datos diarios de precipitación del año 2003 para el área analizada, los valores de TVDI obtenidos fueron contrastados con medias mensuales de PPT.

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 stress 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 stress 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 stress nulo (TVDI=0) o de stress máximo (TVDI=1).

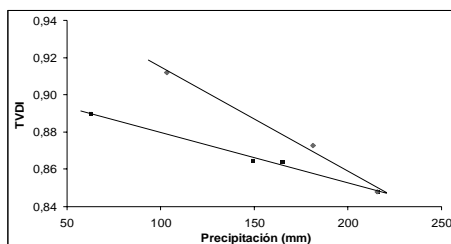


Fig. 6. Relación de TVDI con la precipitación mensual medida en la estación Campo Bom.

Este comportamiento, se presume, podría estar condicionado por la diferencia entre el momento puntual de ocurrencia del fenómeno meteorológico y el día de captura de la imagen, evidenciando la rápida variabilidad temporal del TVDI, y la necesidad de realizar mediciones continuas de parámetros meteorológicos para evaluar con mayor precisión dicha sensibilidad.

Los condicionantes ambientales de la ocurrencia de zonas con distintos niveles de stress hídrico, para una misma precipitación mensual, todavía no son conocidos.

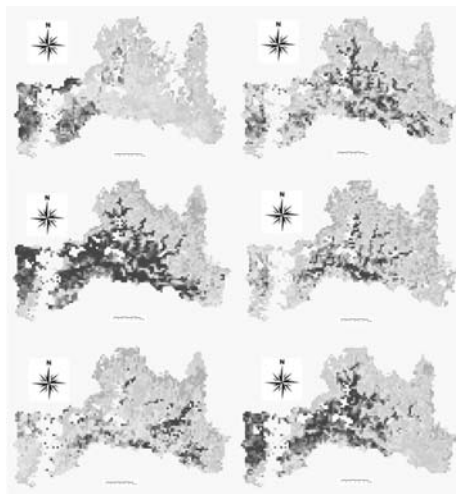


Fig. 7. Mapas de TVDI de la cuenca hidrográfica del río dos Sinos. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: 29/01, 11/04, 20/06, 20/08, 15/10 y 06/12 de 2003.

Mientras tanto, ya se han verificado zonas con niveles permanentes de bajo stress hídrico, lo que se puede observar en los mapas multitemporales de TVDI (Figura 7).

Los mapas producidos para el año 2003 (29/01, 11/04, 20/06, 20/08, 15/10 y 06/12), además de zonas permanentes de elevado o bajo stress hídrico, muestran una gran variación a lo largo del año, lo que estaría indicando una sensibilidad natural del área a las variaciones meteorológicas.

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

Conclusiones

Zonas de stress 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 geológico del agua del acuífero.

Umbral natural de stress hídrico fueron detectados, observándose una tendencia del umbral superior al valor TVDI = 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., 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.
- 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.
- 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. E. 2004. Propuesta de un modelo operativo para la estimación de la evapotranspiración. 2004. 142 p. (I.S.B.N.:84-370-6083-4) Tesis (Doctorado en Física) - Universidad de Valencia, Valencia.
- 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 Guarani 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.