

Obtención de la conductancia de la vegetación a partir de índices espectrales y temperatura superficial para la estimación de la evapotranspiración en vegetación semiárida

L. Morillas ⁽¹⁾, M. García ^(1,2), P. Zarco-Tejada ⁽³⁾, M. Ladrón de Guevara ⁽¹⁾, L. Villagarcía ⁽⁴⁾, A. Were ⁽¹⁾, y F. Domingo ^(1,5).

(1) Departamento de Desertificación y Geoecología. Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. C/General Segura nº 1, 04001- Almería (España) (lmorillas@eeza.csic.es,

monique@eeza.csic.es, poveda@eeza.csic.es)

(2) Departamento de Biología de la Conservación. Estación Biológica de Doñana, CSIC. C/Américo Vespucio s/n, 41092-Sevilla (España), (monicagarcia@ebd.csic.es)

(3) Departamento de Agronomía. Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, 14080-Córdoba (España) (pzarco@ias.csic.es)

(4) Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, 41013-Sevilla (España) (lvilsai@upo.es).

(5) Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Almería, 04120-Almería (España) (fdomingo@ual.es)

ABSTRACT

This work evaluates the possibilities for estimating stomatal conductance (C) and leaf transpiration (Trf) at the ecosystem scale from radiometric indices and surface temperature. The relationships found between indices and the transpiration component of the water balance in a semiarid tussock ecosystem in SE Spain are discussed. Field data were collected from spring 2008 until winter 2009 in order to observe the annual variability of the relationships and the behaviour of spectral indices and surface temperature. The results showed that best relationships with leaf transpiration were found with the PRI index and the Red-Green ratio ($r^2 > 0.86$ for both), and with the vegetation temperature minus the air temperature ($T_c - T_a$) ($r^2 = 0.54$). For stomatal conductance, several indices showed good agreement ($r^2 > 0.7$) with measurements, TCARI/OSAVI, NDWI, SRWI, R_{760} / R_{500} and R_{800} / R_{470} indices. These results showed the applicability of remote sensing data to monitor complex ecophysiological variables at field scale.

Palabras clave: conductancia, transpiración foliar, temperatura superficial, índices radiométricos, vegetación semiárida.

INTRODUCCIÓN

Las alteraciones en el régimen hídrico de un territorio pueden ser indicadores de procesos de degradación (García et al., 2008), por lo que el conocimiento de las componentes del balance hídrico y su tendencia es clave para evaluar el estado de los ecosistemas. La componente principal del balance hídrico en ecosistemas áridos o semiáridos es la evapotranspiración real (ET) que engloba el proceso físico de la evaporación del suelo (E) y el proceso fisiológico de la transpiración de la vegetación (T). La componente transpirativa de la ET en zonas semiáridas está fuertemente controlada por la conductancia de la vegetación (C), que indica la facilidad del paso hacia la atmósfera del vapor de agua a través de los estomas y cuyos métodos de medición en campo son puntuales y sofisticados.

Muchos estudios han demostrado la capacidad de los índices radiométricos como indicadores del estado ecofisiológico de la vegetación (Gamon and Surfus, 1999; Haboudane et al., 2002; Suárez et al., 2008; Zarco-Tejada et al., 2003). La diferencia entre la temperatura superficial de la vegetación (T_c) y la temperatura del aire (T_a), ($T_c - T_a$), ha sido también empleada por varios autores (Jackson and Pinter Jr, 1981; Sepulcre-Cantó et al., 2006) como un índice asociado con el estado hídrico de la vegetación ya que un incremento del mismo suele responder al cierre de estomas de

la planta como respuesta conservativa del agua en condiciones de altas temperaturas y déficit hídrico, y trabajos como el de Jones (1999) demuestran la vinculación entre la conductancia estomática y la temperatura superficial de la vegetación.

Este trabajo muestra los resultados preliminares obtenidos en la estimación de la conductancia (C) y transpiración foliar (Trf) a escala de ecosistema a partir de medidas de temperatura superficial de la vegetación y varios índices espectrales, seleccionados por ser sensibles a cambios en variables asociadas al estrés hídrico, principal factor de control de la conductancia y la transpiración en áreas semiáridas.

MÉTODOS

Los datos empleados en este estudio fueron tomados en un área semiárida de vegetación dispersa localizada en el sureste español dentro del Parque Natural de Cabo de Gata, Almería (30S 0586110 4088786) con vegetación de porte arbustivo dominada por la especie *Stipa tenacissima*. En 7 campañas diarias de medición entre la primavera del 2008 y el invierno del 2009 se midieron C y Trf a escala foliar a lo largo de todo el periodo diurno con un IRGA (Infrarrojo Gas Analyzer, Licor 6400, USA) y Tc con un sensor de temperatura de infrarrojos portátil (Optris Minisight) en un número variable de plantas de *Stipa tenacissima* (entre 5 y 12 según fecha). Ta fue medida en continuo (HMP50, Campbell sci, UK) y se empleó para calcular (Tc-Ta). En cada una de las campañas se tomaron espectros radiométricos de cada planta al mediodía solar, con un espectroradiómetro (GER 2600, GER Corp., Millbrook, NY, USA) en un rango de 400 – 2500 nm.

El presente trabajo analiza las relaciones de estas variables a escala de ecosistema por lo que se trabajó con los promedios de C, Trf, Tc y espectro para el total de las plantas muestreadas.

Tabla 1. Índices radiométricos empleados

Formula	Índice	Relacionado con	Fuente
$R_{860} - R_{1240} / R_{860} + R_{1240}$	NDWI	Contenido hídrico	Gao, 1996
R_{860} / R_{1240}	SRWI	Contenido hídrico	Zarco-Tejada & Ustin, 2001
$R_{570} - R_{531} / R_{570} + R_{531}$	PRI	Relacion carotenos/clorofila, cambios ciclo de las xantofilas	Gamon et al., 1992
$3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{500}) * (R_{700} / R_{670})] / [(1 + 0.16) * (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)]$	TCARI/OSAVI	Contenido en clorofila	Haboudane et al., 2002
R_{760} / R_{500}		Contenido en carotenos	Chappelle et al., 1992
R_{800} / R_{470}		Contenido en carotenos	Blackburn, 1998
$R_{600} - R_{700} / R_{500} - R_{600}$	Red/Green ratio	Contenido en antocianinas	Gamon & Surfus, 1999

En este trabajo se presentan dos análisis, el de las correlaciones entre (Tc-Ta) con las dos variables fisiológicas objetivo, C y Trf a distintas horas en las distintas fechas, y el de las correlaciones entre los índices radiométricos de la vegetación (Tabla 1) medidos al mediodía y las medidas de C y la Trf más próximas a la hora de medida de los espectros antes del mediodía (a.m) y después del mediodía (pm) a las que se han denominado Cam, Cpm, Trfam y Trfpm respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índices radiométricos para la estimación de C y Trf

Varios índices presentaron correlaciones significativas con la C (Figura 1), así la Cam presentó una buena correlación con los dos índices relacionados con el contenido hídrico de la vegetación, Normalized Difference Water Index (NDWI) y Simple Ratio Water Index (SRWI) y con dos de los índices relacionados con el contenido en carotenos, R_{760} / R_{500} y R_{800} / R_{470} . Esto indica la capacidad de dichos índices para estimar C con un retardo de ~1.5 horas que es el desfase horario existente entre la toma de ambas variables en este experimento. Por el contrario, el índice TCARI/OSAVI (Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index normalizado con Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) fue capaz de estimar la C con unas ~2 horas de antelación. En otros trabajos C se ha mostrado mejor correlacionado con

PRI (Photochemical Reflectance Index) que con TCARI/OSAVI (Suárez et al., 2008). El desfase horario implícito en el enfoque experimental del presente estudio o las diferencias espectrales propias del esparto frente a las del olivo podrían explicar esta diferencia de resultados.

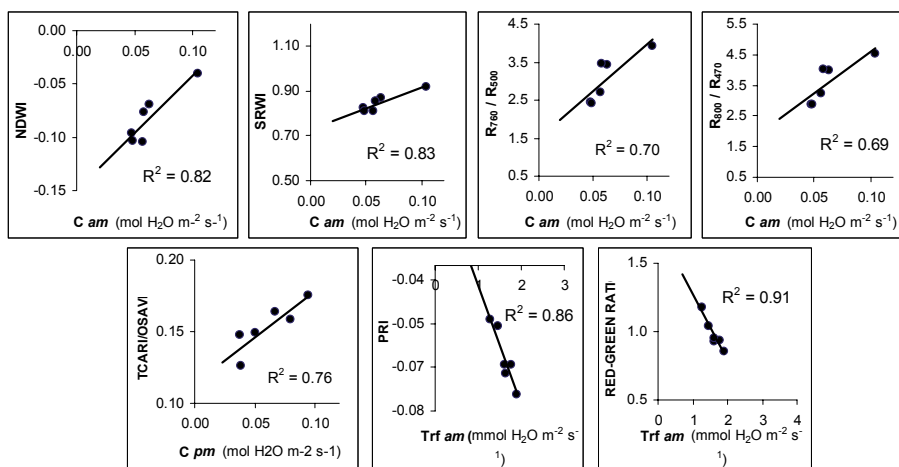


Figura 1. Correlaciones significativas ($p < 0.05$) entre los índices radiométricos y la conductancia medida antes del medio día (C_{am}), después del medio día (C_{pm}) y la transpiración foliar medida antes del medio día (Trf_{am}).

Con respecto a la Trf dos son los índices que mostraron capacidad potencial para estimarla, PRI y Red/Green ratio (Figura 1) mostrando ambos esta relación únicamente con la Trf_{am} de modo que la capacidad de estos índices para estimar la transpiración foliar se muestra nuevamente con un retardo temporal aproximado de 1.5 horas. La de-epoxidación de las xantofilas proceso al que es sensible el índice PRI (Filella et al., 1996) es uno de los mecanismos de disipación de la energía que se ponen en marcha tras un cierre estomático bajo condiciones de estrés hídrico. Esto podría explicar que un descenso en la Trf_{am} resultante del cierre estomático se vea reflejado en posteriores variaciones del índice PRI debidas al comienzo de la de-epoxidación consiguiente.

Temperatura superficial de la vegetación para la estimación de C y Trf

$T_c - T_a$ está correlacionado con la Trf , mientras que no parece mostrar una relación directa inmediata con la conductancia (Figura 2). El primer resultado es consistente con la relación encontrada previamente entre el índice PRI y la Trf , ya que en trabajos anteriores (Suárez et al., 2008) PRI ya mostró relaciones consistentes con ($T_c - T_a$) como indicador de estrés hídrico, que vuelven a confirmarse en el presente estudio en donde se encontró una relación clara entre ambos indicadores ($r^2 = 0.79$, análisis no mostrado). En futuros trabajos se pretende avanzar en la comprensión de estas diferencias con la toma de datos de T_c en continuo.

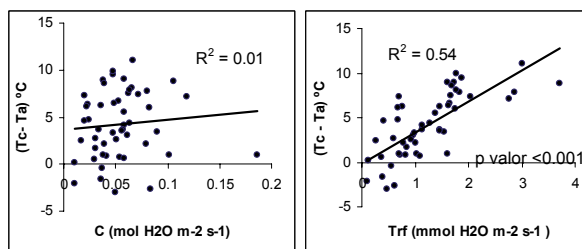


Figura 2. Relaciones entre la temperatura relativa de la vegetación ($T_c - T_a$) y C y Trf. Datos medidos simultáneamente a lo largo de todo el ciclo diurno en 7 días.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo confirman las posibilidades de aplicación de variables procedentes de sensores remotos para la estimación de variables ecofisiológicas fuertemente influidas por procesos complejos y locales. La conductancia foliar presenta posibilidades de parametrización a partir de índices relacionados con el contenido hídrico de la vegetación (NDWI y SRWI), e índices relacionados con la actividad fotosintética, en concreto con el contenido en pigmentos carotenoides (R_{760} / R_{500} y R_{800} / R_{470}) y clorofílicos (TCARI/OSAVI). Por otro lado, la transpiración foliar presenta mejores relaciones con el índice, la temperatura relativa de la vegetación ($T_c - T_a$) y el Red/Green ratio relacionado con el contenido en antocianinas. La relación encontrada entre el índice PRI y ($T_c - T_a$) indica la utilidad de ambos índices como indicadores del estrés hídrico en vegetación semiárida. Por tanto, este estudio abre nuevas posibilidades de parametrización de modelos de evapotranspiración en zonas áridas utilizando imágenes de sensores remotos en el rango solar y térmico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación de varios proyectos de investigación: PROBASE (Ref.: CGL2006-11619/HID) y PREVEA (Ref.: CGL2007-63258/BOS) financiados por el Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia; AQUASEM (Ref.: P06-RNM-01732) y BACAEMA (Ref.: RNM-332) financiados por la convocatoria de Proyectos de Excelencia de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

- ❖ Blackburn, G.A., 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4): 657-675.
- ❖ Filella, I., Amaro, T., Araus, J.L. and Peñuelas, J., 1996. Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum*, 96(2): 211-216.
- ❖ Gamon, J.A. and Surfus, J.S., 1999. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143(1): 105-117.
- ❖ Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266.
- ❖ García, M. et al., 2008. Monitoring land degradation risk using ASTER data: The non-evaporative fraction as an indicator of ecosystem function. *Remote Sensing of Environment*, 112(9): 3720-3736.
- ❖ Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. and Dextraze, L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3): 416-426.
- ❖ Jackson, R.D. and Pinter Jr, P.J., 1981. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. *Signatures spectrales d'objets en teledetection. Colloque ISPRS, Avignon, 1981: 399-406.*
- ❖ Jones, H.G., 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3): 139-149.
- ❖ Sepulcre-Cantó, G. et al., 2006. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(1-2): 31-44.
- ❖ Suárez, L. et al., 2008. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(2): 560-575.
- ❖ Zarco-Tejada, P.J., Rueda, C.A. and Ustin, S.L., 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85(1): 109-124.