

Detección de estrés hídrico en olivar mediante datos hiperespectrales y térmicos del sensor AHS

G. Sepulcre-Cantó¹, P.J. Zarco-Tejada¹, J.C. Jiménez-Muñoz², J.A. Sobrino²,
E. de Miguel³, J. Díaz³ y F.J. Villalobos^{1,4}

¹ Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC),
Alameda del Obispo, s/n, 14004 - Córdoba. gespulcre@ias.csic.es, pzarco@ias.csic.es

² Unidad de Cambio Global, Dpto. de Termodinámica, Universidad de Valencia,
Dr. Moliner 50, 46100 - Burjassot (Valencia)

³ Laboratorio de Teledetección, Dpto. Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera,
Instít. Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Ctra. de Ajalvir, p.k. 4, 28850 - Torrejón de Ardoz (Madrid)

⁴ Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Avda. Meéndez Pidal, s/n, 14080 - Córdoba

RESUMEN

El sensor hiperespectral AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) fue utilizado para obtener imágenes de 2.5 m de resolución espacial en el espectro visible, infrarrojo cercano y térmico en una parcela de olivar en Córdoba (España) con el fin de estudiar la variabilidad espacial y temporal del estrés hídrico. Los datos térmicos del AHS permitieron obtener imágenes de temperatura de superficie de la parcela a las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT el 25 de julio de 2004. EL diseño experimental en bloques aleatorios consistió en aplicar tres dosis diferentes de riego durante julio, agosto y septiembre, realizando medidas semanales de potencial hídrico, fotosíntesis y conductancia para estudiar los efectos del estrés hídrico en el cultivo. Los sensores de infrarrojo IRT permitieron la realización de medidas continuas de temperatura sobre las copas de los árboles, facilitando la validación de las imágenes térmicas. Los resultados de este estudio son presentados, destacando la aplicabilidad en la agricultura de precisión de la teledetección térmica e hiperespectral de alta resolución espacial para el estudio del suministro y la dosificación del riego.

PALABRAS CLAVE: AHS, temperatura, estrés hídrico, riego deficitario, variabilidad espacial.

ABSTRACT

The Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) was used to acquire images with 2.5 m spatial resolution in the visible, near infrared and thermal spectral regions over an olive orchard in Cordoba (Spain) to study the spatial and temporal variability of water stress. The AHS thermal information enabled obtaining surface temperature images of the orchard at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT in 25 July 2004. The experimental design consisted of applying three different irrigation treatments in randomly selected blocks during July, August and September, acquiring measurements of leaf water potential, stomatal conductance and photosynthesis to study the water stress effects on the trees. Infrared sensors IRT placed on top of the trees allowed to obtain continuously temperature measurements, providing validation data for the airborne thermal imagery. Results of this study are presented, suggesting that hyperspectral and high resolution remote sensing methods have important applicability in precision agriculture for management of controlled deficit irrigation methods.

KEY WORDS: AHS, temperature, water stress, deficit irrigation, spatial variability.

INTRODUCCIÓN

La teledetección puede ser un instrumento de gran utilidad para el estudio del estrés hídrico, ya que permite obtener información térmica y reflectiva asociada a la variabilidad espacial y temporal del estado fisiológico del cultivo. El desarrollo de los sensores térmicos de infrarrojos ha motivado la realización de estudios en los que se ha utilizado la

temperatura como indicador de estrés hídrico. Esto se debe a que cuando la vegetación sufre déficit hídrico, ésta aumenta su temperatura debido al cierre estomático con el que la planta evita su deshidratación. Tanner (1963) utilizó sensores térmicos de infrarrojos observando que la temperatura era un índice cualitativo valorable para la determinación de diferentes regímenes hídricos de las plantas. Posteriormente, se han hecho multitud de estudios

en esta línea, algunos usando la medida de la temperatura respecto a muestras bien regadas como índice de estrés (e.g. Fuchs and Tanner 1966; Clawson and Blas, 1982; Berliner *et al.*, 1984), usando la diferencia entre la temperatura de la vegetación y la del aire (Jackson *et al.* 1977; Ehler *et al.*, 1978) o proponiendo el índice de estrés de tipo empírico CWSI (Crop Water Stress Index) (Idso *et al.* 1981; Jackson *et al.*, 1981).

En la estimación de la temperatura a escalas globales podemos diferenciar entre sensores aerotransportados como el *Airborne Thematic Mapper* (ATM), *Digital Airborne Imaging Spectrometer* (DAIS), *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS) que tienen bandas espectrales en la región del térmico, y sensores en satélites como el *Lansat TM*, *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) que permiten la estimación de la temperatura superficial a resoluciones espaciales de tipo medio y global.

Los estudios conducentes a la estimación de la temperatura de superficie con alta resolución espacial, a nivel de árbol, son muy escasos. Con alta resolución espacial, Sobrino *et al.* (2004) realizaron un análisis de la calidad de imágenes DAIS comparando datos de temperatura *in situ*, obteniendo errores para la temperatura de la superficie terrestre entre 1K y 1.5 K. La complejidad en la utilización de estos sensores para la estimación absoluta de la temperatura son las correcciones atmosféricas que deben realizarse, así como la estimación de la emisividad de la superficie, y otro tipo de factores como la variabilidad y heterogeneidad de las superficies.

Por todo lo dicho anteriormente y debido a la importancia que tiene el olivar en España y en países mediterráneos, el objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad de detectar la variabilidad espacial y temporal del estrés hídrico en una parcela de olivar con el sensor térmico e hiperespectral AHS de alta resolución espacial, utilizando para ello un ensayo de riego deficitario controlado y 3 vuelos diurnos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo de julio a noviembre de 2004 en una parcela de olivar de 4 ha en Córdoba (37.8°N, 4.8°W). El clima de la zona es mediterráneo, con un promedio anual de lluvias de 650 mm

concentrado entre otoño e invierno y evapotranspiración potencial de 1390 mm.

Se aplicaron un total de tres tratamientos de riego con el fin de obtener tres niveles de estrés hídrico; 2.8 mm/día (tratamiento R, bien regado), 0.7 mm/día (tratamiento deficitario S1) y un promedio de 0.7 mm/día, aplicado de manera intermitente (tratamiento deficitario S2). La distribución de los tratamientos se realizó de manera aleatoria en 6 filas de 18 olivos cubriendo un área de 2646 m². Un total de 10 sensores de infrarrojos (modelo IRTS-P, Apogee, UT, USA) se instalaron sobre las copas de árboles de forma permanente. Los sensores IRTS-P trabajan en la banda espectral de 6.5 a 14 μm , con un FOV de 52°, permitiendo obtener una medida de temperatura integrada para toda la copa con un error de $\pm 0.4^\circ$ para un intervalo de temperaturas de 5 a 40°. Los datos de temperatura se almacenaron cada 5 minutos en tres dataloggers (modelo CR10X, Campbell Sci., UT, USA). Campañas de campo adicionales consistieron en la realización de medidas semanales de potencial hídrico de xilema a las 10:00 GMT con una bomba de presión Scholander (Soilmoisture equipment Corp., PWSC modelo 3000, Gran Bretaña). También se realizaron medidas de conductancia estomática con un porómetro steady state (modelo PMR-4, PP Systems, Hitchin Herts, Gran Bretaña) y de fotosíntesis con un CIRAS-1 (PP Systems, Hitchin Herts, GB). Adicionalmente, la temperatura del aire se midió con una Vaisala (modelo WXT510, Vaisala Instruments, Helsinki, Finland).

El instrumento utilizado para la adquisición de las imágenes térmicas de alta resolución espacial fue el sensor hiperespectral aerotransportado *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS) (Daedalus Enterprise Inc., WA, EEUU). Mediante este sensor de imagen se registró la radiación procedente de la superficie en 38 bandas espectrales cubriendo la región desde 0.43 μm hasta 12.5 μm con un FOV de 90° y un IFOV de 2.5 mrad. Un total de 10 bandas del sensor pertenecen a la región del espectro térmico, entre 8 μm y 13.2 μm , con 0.4 μm de ancho de banda, canales que fueron usados para la obtención de la temperatura de superficie. Se realizaron tres vuelos con objeto de estudiar la variación diurna de temperatura, a las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT el día 25 de julio del 2004, volando a 1000 m de altitud y obteniendo imágenes de 2.5 m de resolución espacial (Figura 1).



Figura 1. Imagen de la parcela de estudio de olivar (recuadrada) tomada por el sensor aerotransportado AHS.

La emisividad de los árboles se estimó con un radiómetro CIMEL (CIMEL Electronique, Paris) mediante el método TES (Temperature-Emissivity Separation) (Gillespie *et al.*, 1998). La corrección atmosférica de la imagen se realizó usando el modelo MODTRAN (Berk *et al.*, 1989) asumiendo una atmósfera de latitud media en verano. Para obtener temperatura de superficie (T_s) a partir de la información recogida por el sensor en el infrarrojo térmico se ha partido de la ecuación de transferencia radiativa, RTE, que puede ser escrita según la Ecuación [1] para la región del infrarrojo térmico.

$$L_{\lambda}^s = \left\{ \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{at\downarrow} \right\} \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{at\uparrow} \quad [1]$$

donde L_{λ}^s es la radiancia que llega al sensor, ε_{λ} la emisividad superficial, $L_{\lambda}^{at\downarrow}$ la radiación atmosférica descendente, τ_{λ} la transmisividad atmosférica, $L_{\lambda}^{at\uparrow}$ la radiación atmosférica ascendente, y $B_{\lambda}(T_s)$ la radiancia emitida por un cuerpo negro a una temperatura T_s dada por la Ecuación [2],

$$B_{\lambda}(T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [2]$$

donde $C_1 = 2hc^2 = 1.1911 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$, y $C_2 = (hc/k) = 1.43877 \cdot 10^4 \mu\text{mK}$. Los bloques pertenecientes a un mismo tratamiento, así como los árboles individuales sometidos a cada tratamiento se identificaron mediante el software de procesamiento de imágenes ENVI (Research Systems Inc., CO, USA), aplicando diferentes umbrales de NDVI para seleccionar píxeles de vegetación pura correspondientes a cada copa.

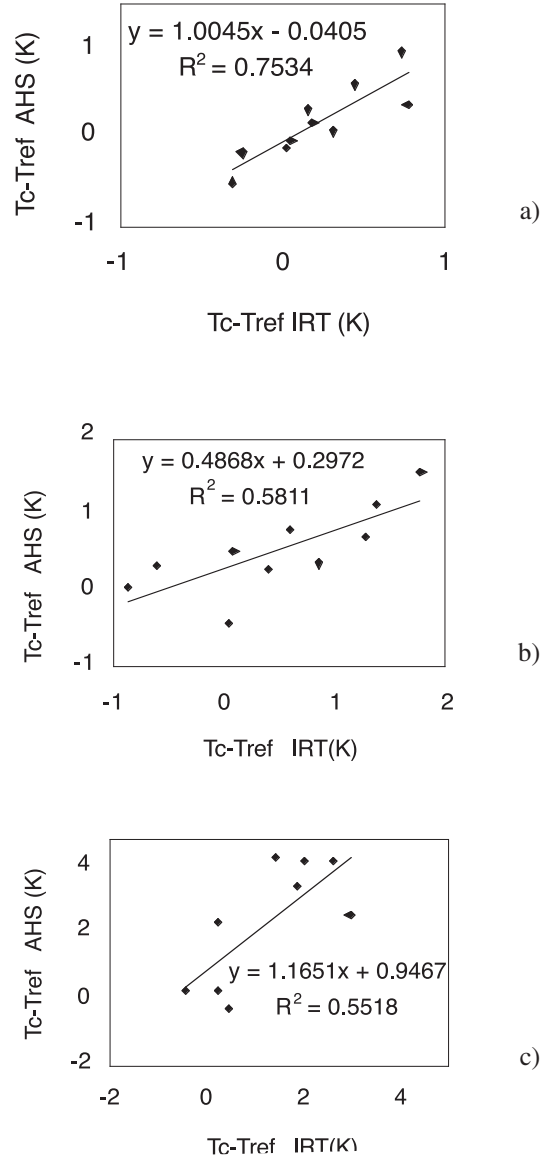


Figura 2. Comparación de las diferencias de temperatura respecto a los puntos de control para cada árbol obtenidas a partir de las imágenes del AHS y medidas con los sensores IRT para las tres horas de vuelo: 7:30 (a), 9:30 (b) y 12:30 GMT (c).

RESULTADOS

El resultado de comparar las diferencias de temperatura de copa respecto al valor medio de temperatura de los árboles bien regados obtenidas a partir de las imágenes del AHS y a partir de las medidas de los sensores de campo IRT se muestra en la Figura 2. Los coeficientes de determinación obtenidos entre los datos AHS y de campo de $r^2=0.75$ (7.30 GMT), $r^2=0.58$ (9.30 GMT), y $r^2=0.55$ (12.30 GMT) sugieren que los datos del sensor AHS permiten diferenciar árboles bajo diferentes grados de estrés a partir de la temperatura estimada de cada copa.

La relación obtenida entre el potencial hídrico de cada árbol y la temperatura de copa medidas por los sensores de campo IRT el día del paso del avión se muestra en la Figura 3. El coeficiente de determinación $r^2 = 0.51$ obtenido sugiere la viabilidad de detección del estrés hídrico sufrido por el olivo a partir de los datos de temperatura.

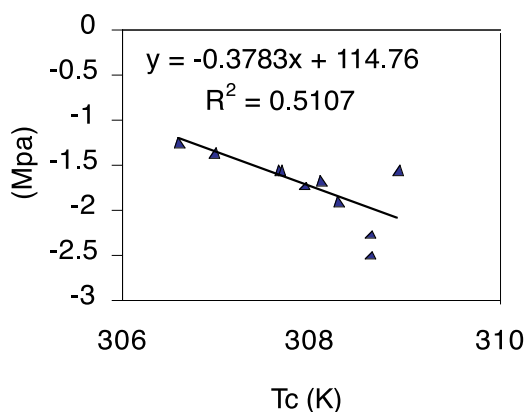


Figura 3. Relación entre potencial hídrico y temperatura medida por los sensores de campo IRT el día 25 de julio del 2004.

Las imágenes a nivel de parcela de las diferencias de temperatura de la vegetación respecto a los puntos de control de árboles bien regados se observan en la Figura 3. En dichas imágenes se puede apreciar la evolución espacial y temporal de las diferencias de temperatura asociadas al estrés hídrico, mostrando claramente un aumento de la diferencia de temperatura a lo largo del día. Las imágenes obtenidas de temperatura de la cubierta menos del

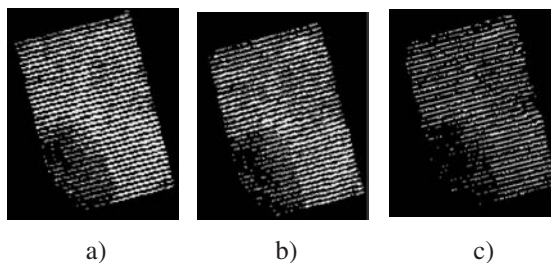
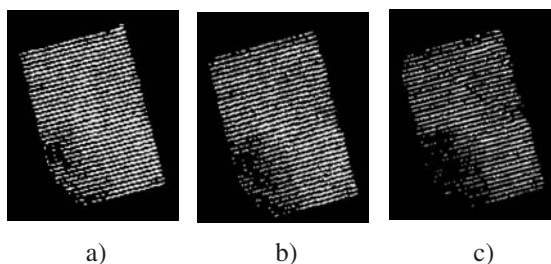


Figura 3. Imágenes de las diferencias de temperatura respecto a los árboles control, obtenidas a partir de las imágenes del AHS para 7:30 a), 9:30 b) y 12:30 c) GMT. En azul: diferencias dentro del intervalo [-2,2 K], en rojo diferencias dentro del intervalo [2,8 K].



***Figura 4.** Imágenes de $T_c - T_a$ obtenidas para 7:30 a), 9:30 b) y las 12:30 GMT c). Los colores para los diferentes intervalos de temperatura son: azul de -2 a 1 K, amarillo de 1 a 4 K y rojo de 4 a 8 K.

aire ($T_c - T_a$) (Figura 4) muestran diferencias entre la temperatura de la vegetación y la del aire de hasta 8 K a las 12:30 GMT.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el sensor hiperespectral y térmico de tipo aerotransportado AHS, y con los sensores de campo de infrarrojo IRT para árboles sometidos a distintos tratamientos de estrés hídrico muestran que las variaciones de temperatura de la vegetación, asociadas al estrés hídrico, pueden ser detectadas usando teledetección térmica de alta resolución espacial. El uso de un sensor aerotransportado de estas características permite, además, obtener mapas de la variabilidad espacial y temporal del estrés hídrico. Estos resultados tienen una gran aplicabilidad para la agricultura de preci-

sión en el estudio espacial de las necesidades hídricas y el control de riego, sugiriendo la viabilidad de detección de estrés a nivel de árbol, así como conectando con su potencial aplicabilidad en estimación de la evapotranspiración y estimación de rendimientos a nivel de parcela.

BIBLIOGRAFÍA

- BERLINER P., OSTERHUIS D.M. y GREEN G.C. 1984. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. *Agricultural and Forest Meteorology*. 31: 219-230.
- BERK, A., BERSTEIN, L.S. y ROBERSTON, D.C. 1989. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Technical Report GL-TR-89-0122, Geophys. Lab, Bedford, MA.
- CLAWSON, K.L. y BLAD, B.L. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal*. 74: 311-316.
- FUCHS, M. y TANNER, C.B. 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*. 58: 597-601.
- GILLESPIE, A. R., ROKUAGAWA, S., HOOK, S., MATSUNAGA, T. y KAHLE, A.B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 36: 1113-1126.
- IDSO S.B., JACKSON R.D., PINTER P.J., REGINATO R.J. y HATFIELD J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural and Forest Meteorology*. 24: 45-55.
- JACKSON R.D., REGINATO R.J. y IDSO S.B. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. 13: 651-656.
- JACKSON, R. D, IDSO, S. B. REGINATO R. J. y PINTER JR. 1981b. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*. 17 (4):1133-1138.
- SOBRINO J.A., JIMÉNEZ-MUÑOZ J.C., EL-KHARRAZ J., GÓMEZ M., ROMAGUERA M. y SÒRIA G. 2004. Single-channel and two channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*. 25: 215-230.
- TANNER, C. B. 1963. Plant temperatures. *Agronomy Journal*. 55: 210-211.

