UNIVERSITAT DE VALÈNCIA



Facultat de Física Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN ÁRBOLES FRUTALES MEDIANTE TELEDETECCIÓN TÉRMICA DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL AHS E IMÁGENES ASTER

Tesis Doctoral **Guadalupe Sepulcre Cantó** Mayo, 2008

José Antonio Sobrino y Rodríguez, Profesor Titular de Física de la Tierra de la Universitat de València, y

Pablo J. Zarco Tejada, Investigador principal del Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC, Córdoba),

CERTIFICAN: Que la presente Memoria "**Detección de estrés hídrico en árboles frutales mediante teledetección térmica de alta resolución espacial AHS e imágenes ASTER**", ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Física de la Tierra y Termodinàmica de la Facultat de Física por Dña. **Guadalupe Sepulcre Cantó**, y constituye su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Física.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Burjassot (Valencia), a 6 de mayo de 2008.

Fdo.: J. A. Sobrino y Rodríguez

Fdo.: P. J. Zarco Tejada

Índice

Agradecimientos		
INTRODUCCIÓN		
Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9	
1.1 INTRODUCCIÓN	11	
1.2 ECOFISIOLOGÍA DEL ESTRÉS HÍDRICO	12	
1.2.1 Potencial Hídrico	12	
1.2.2 Cierre estomático	14	
1.3 OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE	15	
1.3.1 Ecuación monocanal	15	
1.3.2 Método bacanal	16	
1.3.3 Método TES	17	
1.4 MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA	19	
1.4.1 Modelo 3-D DART	20	

Capítulo 2 DETECCIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN A MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN	ÁRBOLES 25
2.1 INTRODUCCIÓN	27
2.2 EXPERIMENTOS DE CAMPO	29
2.2.1 Descripción y localización de los experimentos	29
2.2.1.1 Parcela de olivar	29
2.2.1.2 Zona de melocotonero	
2.2.2 Medidas in situ relacionadas con estrés hídrico	
2.2.2.1 Potencial hídrico	35
2.2.2.2 Conductancia estomática	
2.2.2.3 Fotosíntesis	37
2.2.2.4 Temperatura de la copa	
2.2.2.4.1 Sensores térmicos	
2.2.2.4.2 Calibrado	40
2.2.2.4.3 Cámara térmica	44
2.3 RESULTADOS	44
2.3.1 Seguimiento de datos in situ	
2.3.1.1 Potencial hídrico	
2.3.1.2 Conductancia estomática	
2.3.1.3 Fotosíntesis	49
2.3.1.4 Temperatura de la copa	
2.3.1.4.1 Distribución de temperatura	a a partir de
imágenes obtenidas con cámara térmi	ica56
Capítulo 3 DETECCIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO Y SUS EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL FRUTO, M TELEDETECCIÓN TÉRMICA DE ALTA RESO ESPACIAL	EFECTOS EDIANTE OLUCIÓN 61
3.1 INTRODUCCIÓN	63
 3.2 MATERIALES Y MÉTODOS 3.2.1 Sensor aerotransportado AHS 3.2.2 Producción y parámetros de calidad del fruto 3.2.3 Tratamiento de los datos AHS 	65 65 69 71

ii

3.3 RESULTADOS
3.3.1 Relación entre temperatura y estrés hídrico
3.3.2 Distribución espacial del estrés hídrico
3.3.2.1 Mapas de Tc-T _R
3.3.2.2 Mapas de Tc-Ta
3.3.3 Relación entre datos térmicos obtenidos con AHS, producción
v calidad del fruto
3.3.3.1 Resultados para olivar
3.3.3.2 Resultados para melocotonero
r
3.4 ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL USO DE ASTER PARA
DETECCIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO A PARTIR DE DATOS AHS94
Capítulo 4 DETECCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL CULTIVO
CON TELEDETECCION DE RESOLUCION ESPACIAL MEDIA99
4.1 INTRODUCCIÓN101
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS103
4.2.1 Zona de estudio103
4.2.2 Procesamiento de las imágenes ASTER105
4.2.2.1 Temperatura105
4.2.2.2 Índices de vegetación
4.2.3 Datos auxiliares
4.2.3.1 Modificación del vectorial
4.2.3.2 Obtención del porcentaie de cobertura vegetal110
4.2.4 Análisis de los datos ASTER
4.3 RESULTADOS115
4.3.1 Relaciones entre la temperatura efectiva del píxel ASTER y el
estado hídrico de la vegetación115
4.3.2 Evaluación de la temperatura y de los índices de vegetación
para la detección del manejo de riego118
4.3.2.1 Estudio de la temperatura y de los índices de
vegetación para cada imagen individu118
4.3.2.2 Estudio de la temperatura y de los índices de vegetación
para toda la serie temporal ASTER119

4.3.2.3 Evaluación de la temperatura eliminando los efectos de las distintas densidades de vegetación
Capítulo 5 ESTUDIO DE SIMULACIÓN CON EL MODELO DE TRANSFERENCIA RADIATIVA DART127
5.1 INTRODUCCIÓN129
 5.2 MATERIALES Y MÉTODOS
 5.3 RESULTADOS
RESUMEN Y CONCLUSIONES147
BIBLIOGRAFÍA155
Anexo I

iv

E., Vega V. & Pastor M. (2007). *Remote Sensing of Environment*, 107, pp. 455-470.

vi

Agradecimientos

viii

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo:

A mi director el Dr. José Antonio Sobrino Rodríguez por su apoyo y sus enseñanzas y sobretodo por confiar en mí para el desempeño de este trabajo.

A mi director y amigo el Dr. Pablo Zarco Tejada, con quien ha sido un gran honor haber trabajado estos años. Por todo el tiempo dedicado, por toda la motivación infundida y por todo lo que me aprendido a su lado. Gracias de verdad, por cada no pasa nada, cada por favor, cada gracias, cada enhorabuena; no podría haber tenido un "jefe" mejor.

A Auxiliadora Soriano, por estar siempre disponible para ayudar, enseñar y resolver dudas, por su detallada revisión del documento y sobretodo, por todo el cariño que me ha regalado.

Al resto de miembros del departamento de agronomía del IAS-CSIC de los que he aprendido muchísimo: A Elías Fereres, por su apoyo científico y humano, a Luca Testi por su inestimable ayuda siempre que la he necesitado, a Francisco J. Villalobos y Francisco Orgaz, a Ignacio por su ayuda técnica y a Carmen Ruz. Ha sido un placer y también un honor trabajar entre vosotros.

A mis compañeras y sobre todo amigas: Lola, Marga y Mari Luz que me han llenado de alegría cada día. A Berni, gracias al que sobreviví entre otras cosas, a un par de programas IDL. A los demás compañeros del Instituto de Agricultura Sostenible: Oscar, Manuel, David, Victoria, Jesús, Fernando y Santi, sin olvidar a los que ya no andan por allí pero que me acompañaron en algún momento: Simona, Almudena, Iñaki y Carlos, no sólo porque siempre he contado con su ayuda, sino también por hacer del trabajo un placer y hacerme sentir en Córdoba como en casa.

A mis compañeros de la unidad de cambio global, especialmente a Juan Carlos por todo lo que ha trabajado conmigo vía msn y por haber estado siempre disponible para contestar cualquier duda. A Guillem, siempre dispuesto a solucionarte cualquier problema informático, a Yves, Juan, Marian, Cristian, Mónica y Malena.

A mis hermanos, por su cariño y a mis padres, porque todo lo que soy es gracias a ellos. Por su apoyo y haberme abierto siempre la puerta a estudiar lo que yo quisiera aunque tuviera que alejarme (un poquito y sólo físicamente) de su lado.

A mis compañeros y amigos de facultad: Toni, Ceci, Toni 2, Nando y Pau porque seguís a mi lado y, como os he dicho tantas veces, si no hubiera sido por esos desayunos que compartí con vosotros nunca hubiera acabado la carrera. Sabéis que os adoro.

A Pascual, por su apoyo incondicional, por su comprensión y por hacerme más feliz cada día.

A todos gracias.

Х

El trabajo mostrado en esta memoria ha sido posible gracias a la financiación de los siguientes proyectos:

2007-09. Estudio sobre la utilización de satélites térmicos de resolución media para identificación de parcelas de olivar en regadío en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir. DAP-CHG. P.I.: Pablo J. Zarco Tejada.

2004-08. Deficit Irrigation for Mediterranean Agricultural Systems (DIMAS), INCO-CT-2004-509087 European Commission under the Sixth Framework Programme. P.I.: Elías Fereres Castiel.

2002-05. Estimación de Variables Biofísicas en Cultivos de Olivar y Vid mediante métodos de Teledetección Hiperespectral para su Integración en Agricultura de Precisión (AGRISPECTRA) - AGL2002-04407-C03, Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCyT), Entidades participantes: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) - AGL2002-04407-C03-01, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) - AGL2002-04407-C03-02, y Universidad de Valladolid (UVA) - AGL2002-04407-C03-03. P.I.: Pablo J. Zarco Tejada.

xii

1

Introducción

Introducción

Las zonas mediterráneas se caracterizan por la sequía y alta demanda evaporativa estival, lo que produce que el suministro de agua del suelo sea insuficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos durante el verano. El agua de riego contribuye a paliar este déficit, pero este suministro también es insuficiente muchos años para satisfacer la demanda de los regadíos. En este contexto, para una optimización del uso de los recursos hídricos se hace necesario el conocimiento de las relaciones hídricas del cultivo y del efecto de los déficits hídricos en la producción final. El estrés hídrico puede producir notorias reducciones en el rendimiento de los cultivos, dependiendo del nivel de estrés y del momento en que éste se produce, por lo que la utilización de técnicas de teledetección que nos permitan detectar el momento e intensidad del estrés hídrico sería de gran utilidad, tanto para la introducción de medidas correctoras como para la cuantificación de sus efectos sobre la producción final. Con el uso de la teledetección se busca hacer una evaluación previsual y no invasiva del estado hídrico del cultivo, además el uso de distintas técnicas de teledetección nos permite monitorizar el cultivo a distintas escalas espaciales.

Esta línea de estudio en teledetección trabaja a partir de la interacción de la radiación con la vegetación. La mayor parte de la energía absorbida por las hojas es disipada en forma de calor. Esto ha provocado que se haya estudiado mucho la transferencia de calor entre la vegetación y el ambiente y que se hayan realizado multitud de trabajos en los que se ha contrastado el uso de la medida de la temperatura de la vegetación como indicador de estrés hídrico. Esto se explica fisiológicamente debido al cierre estomático, mecanismo de defensa que presentan las plantas para evitar la deshidratación ante un estrés hídrico, lo que provoca un recalentamiento de las hojas al disminuir la pérdida de calor latente en la transpiración.

Se han realizado numerosos estudios que muestran que la temperatura de la cubierta es una variable útil en el estudio y detección del estrés hídrico en cultivos herbáceos, existiendo muy pocos trabajos sobre detección de estrés hídrico mediante la temperatura en árboles. Esto aún se hace más patente en el caso de teledetección aerotransportada o a bordo de satélite, donde la mezcla del suelo y las sombras, además de la vegetación, en la información del píxel, hace mucho más difícil la interpretación de los resultados.

Por todo lo dicho anteriormente, se requieren estudios que desarrollen nuevos métodos de detección del estrés hídrico en árboles a partir de la medición remota de la temperatura, que comprendan diversas escalas espaciales (desde el estudio de un árbol individual, hasta el estudio de las condiciones de una parcela de cultivo o el de una cuenca hidrográfica) y que tengan en cuenta los problemas de mezcla de componentes, dentro del píxel, que plantean los cultivos abiertos. Esto último es importante no sólo en la detección del estrés hídrico para prevenir pérdidas en la producción del cultivo, o en la identificación del estado hídrico del cultivo para diseñar estrategias de manejo del agua, sino también para solucionar los problemas que surgen a la hora de introducir la información térmica de este tipo de cultivos (cultivos abiertos) en modelos de estimación de la evapotranspiración a partir de datos de teledetección.

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre la detección de estrés hídrico en dos especies de árboles frutales, olivo, de gran importancia en la región, y melocotonero, utilizando técnicas de teledetección a tres escalas de trabajo: i)

mediante sensores térmicos de tipo puntual instalados sobre las copas de árboles, bajo distintos tratamientos de riego localizado; ii) mediante el vuelo de un sensor aerotransportado de alta resolución espacial, obteniendo imágenes en la región del visible, infrarrojo y térmico, que nos permite el estudio de la variabilidad espacial y temporal; y iii) trasladando los métodos desarrollados con el sensor de alta resolución espacial de tipo aerotransportado a satélite, con el objeto de desarrollar metodologías de monitorización del estrés hídrico de tipo operativo con resolución espacial media. Entre estos métodos se encuentra el uso del modelo de transferencia radiativa DART, para estudiar los efectos de los distintos componentes del píxel en el estudio del estrés hídrico y en la evaluación de las necesidades hídricas del cultivo.

Con respecto a los cultivos sobre los que se ha trabajado, el olivo es un cultivo de gran importancia en España, con 2,5 millones de ha y más de 200 millones de olivos plantados (AAO, 2008), y especialmente en Andalucía donde el 17% de la superficie de la región (1,5 millones ha) es de olivar. Por otro lado, el melocotonero es uno de los frutales de mayor importancia a nivel mundial, del cual se producen mas de 15 millones de toneladas de fruta al año (FAOSTAT, 2008), de las que más del 40% se produce en los países mediterráneos. Otro aspecto a considerar en la elección de estas dos especies, aparte de su importancia, son las grandes diferencias en las características de ambas cubiertas (diferencias en arquitectura, color y tamaño de hoja entre otras) que afectan al balance de energía sobre la cubierta.

La memoria está organizada en 5 capítulos:

El Capítulo 1 en el que se exponen los fundamentos teóricos, que se relacionan con la ecofisiología del estrés hídrico, cuya detección es el objetivo de este estudio, y sus efectos en el cultivo. Así como la descripción de los métodos usados para la detección de la temperatura de superficie (LST) en todas las partes del estudio. Introduciendo finalmente información acerca de los modelos de transferencia radiativa existentes, poniendo especial interés en el modelo DART, utilizado en la última parte del estudio.

El Capítulo 2, en el que se describe la detección del estrés hídrico, en el cual se han monitorizado distintos parámetros fisiológicos del cultivo, para caracterizar el grado de estrés hídrico al que se encuentran los árboles sometidos a distintos tratamientos de riego. Evaluando la capacidad de la temperatura, adquirida por medio de sensores puntuales de infrarrojo térmico y por medio de una cámara térmica, de detectar los distintos niveles de estrés hídrico inducidos en los árboles.

El Capítulo 3, en el que se presenta el estudio realizado usando imágenes tomadas con el sensor aerotransportado AHS, para estudiar los efectos del estrés hídrico en la temperatura del árbol (tanto olivo como melocotonero), y su relación con la producción y parámetros de calidad del fruto, así como la capacidad que ofrece el sensor de estudiar la variabilidad, tanto espacial como temporal, del estrés hídrico dentro de la parcela de cultivo. En el último apartado se hace un estudio donde se evalúa la potencialidad de extrapolar estas metodologías, aplicadas a alta resolución, a escala ASTER (resolución espacial media).

El Capítulo 4, en el que se presenta el análisis realizado para la detección del estado hídrico en parcelas de olivar, a partir de una serie de 6 años de imágenes ASTER e información de más de 1000 parcelas de olivar, las cuales comprenden tanto parcelas en secano como en regadío. En este estudio se utilizó tanto la información térmica como la información del visible y del infrarrojo cercano del sensor ASTER, evaluando la capacidad tanto de distintos índices de vegetación como de la temperatura para identificar el régimen hídrico de las distintas parcelas.

Por último, el Capítulo 5, en el que se usa el modelo de transferencia radiativa DART para evaluar la influencia de los distintos componentes de una escena en el valor final del píxel, y las implicaciones que esto tiene en la detección potencial de estrés hídrico cuando se trabaja con resolución espacial media y en cultivos abiertos, como es el caso presentado. Discutiéndose las implicaciones del uso de información térmica de media y alta resolución de este tipo de cultivos como entrada en modelos de evapotranspiración.

Tras el capítulo 5, se presenta el Resumen y las Conclusiones del trabajo realizado y la Bibliografía citada a lo largo del trabajo. Para concluir, los Anexos I,

II, III y IV recogen 4 publicaciones en revistas internacionales, fruto del trabajo que se presenta en esta memoria, realizado durante estos años de estudio.

Introducción

Capítulo 1 Fundamentos teóricos

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una revisión de los conceptos y procesos fundamentales sobre los que se basa el desarrollo de este trabajo. Se define y explica el concepto de estrés hídrico y cuáles son sus efectos en el cultivo. Conociendo los efectos del déficit hídrico sobre los cultivos se pueden cuantificar y monitorizar dichos efectos mediante las técnicas de medida apropiadas, lo cual es crítico para detectar niveles de estrés hídrico y poder aplicar las prácticas de manejo de riego óptimas que permitan obtener los niveles máximos de producción o de eficiencia en el uso del agua.

Uno de los efectos del estrés hídrico en la vegetación es el aumento de la temperatura de ésta, debido al cierre estomático que provoca una disminución en la transpiración de la planta. Este aumento de la temperatura de la vegetación será la magnitud que se buscará medir y monitorizar, mediante distintas técnicas de teledetección, y relacionar con el nivel de estrés hídrico del cultivo, en los distintos capítulos en los que se ha divido el trabajo que se expone en esta memoria. En este capítulo, por tanto, se describirán también las distintas metodologías usadas para

obtener la temperatura de superficie (LST) a partir de los datos de radiancia detectados por el sensor.

Por último, se hace una breve introducción sobre los modelos de transferencia radiativa que usan la región espectral del infrarrojo térmico y se explica más detalladamente el modelo utilizado en este trabajo, el modelo DART (Guillevic *et al.*, 2003), que añade a todos los demás modelos la posibilidad de usar distribuciones tridimensionales de los distintos elementos de la escena, permitiendo simular, por primera vez en el infrarrojo térmico para este tipo de modelos, cultivos abiertos, como es el caso de los frutales objeto de estudio en este trabajo.

1.2 ECOFISIOLOGÍA DEL ESTRÉS HÍDRICO

Las plantas transportan agua desde el suelo hasta la atmósfera siguiendo un gradiente de potencial hídrico. Los flujos de agua desde el suelo atraviesan el sistema radical y son transportados mediante los vasos conductores del xilema hasta las hojas, donde se evapora a través de los estomas, siguiendo el gradiente de presión de vapor, y pasa a formar parte del vapor de agua de la atmósfera. Un desfase en el proceso de transporte de agua desde el suelo hasta la atmósfera provoca un déficit hídrico en la planta, que puede afectar negativamente al rendimiento. El estado hídrico de la planta se expresa en términos energéticos mediante el potencial hídrico.

1.2.1 Potencial hídrico

El potencial hídrico en la hoja es función del potencial del agua en el suelo (Ψ_s) , de las resistencias al flujo de agua entre el suelo y la hoja (r_{s-h}) y de la tasa de transpiración (T):

$$\Psi_{\rm h} = \Psi_{\rm s} - (T \times r_{\rm s-h})$$
[1.1]

La hoja debe bajar su potencial hídrico para que el agua se mueva hacia ella, por lo que siempre que haya transpiración habrá un déficit hídrico en la hoja. Sin embargo, se considera que una planta sufre estrés o déficit hídrico cuando el potencial del agua en sus tejidos decrece tanto como para afectar negativamente al

funcionamiento de los procesos fisiológicos. Las causas que pueden conducir a un bajo potencial hídrico en la hoja y por tanto a un estrés hídrico son las siguientes:

- a) Bajo potencial hídrico del suelo (bajo contenido de agua y/o elevado contenido en sales en la solución del suelo).
- b) Alta demanda evaporativa (elevada transpiración)
- c) Alta resistencia al flujo del agua, en el suelo o en la planta, (baja conductividad hidráulica del suelo, baja densidad radical, enfermedades vasculares, etc) (Villalobos *et al.*, 2002)

El flujo del agua en las plantas está regulado por las diferencias de potencial hídrico. Éste se define como la diferencia entre el potencial químico del agua para una condición dada y el potencial químico del agua pura, normalizado por el volumen molar del agua: Así, el potencial hídrico (Ψ) en el sistema suelo-planta-atmósfera se define como:

$$\Psi = (\mu_{\rm H2O}, \mu_{\rm H2O}^0) / V_{\rm H2O}$$
[1.2]

donde μ_{H2O}^0 es el potencial químico del agua en estado puro y en unas condiciones de referencia de presión y temperatura, μ_{H2O} es el potencial químico del agua en el sistema considerado y V_{H2O} es el volumen molar parcial del agua. De esta manera, el potencial hídrico indica la energía libre (capacidad de realizar un trabajo) del agua en un punto del sistema en comparación con la del agua pura en condiciones estándar, que se toma arbitrariamente como 0.

El agua tenderá a ir espontáneamente de zonas con alto potencial hídrico a zonas con bajo potencial hídrico dentro del sistema considerado. El potencial hídrico tiene unidades de energía por unidad de masa o de volumen, que es dimensionalmente equivalente a unidades de presión (MJ m⁻³ = MPa). Usualmente el potencial hídrico de las plantas se expresa en MPa (MPa = 10 bares = 9,87 atm). Se asigna un valor de potencial hídrico de 0 al agua pura, al nivel del mar y a la presión atmosférica. En el caso de las plantas, el valor del Ψ es generalmente negativo y se puede describir de forma simplificada como:

$$\Psi = \psi_{\rm p} + \psi_{\rm s} + \psi_{\rm m} \tag{1.3}$$

ecuación que expresa el potencial hídrico total en función de tres componentes: potencial de presión (Ψ_p) , potencial osmótico (Ψ_s) y potencial matricial (Ψ_m) . Donde el potencial de presión es la presión en exceso de una atmósfera ejercida sobre el sistema, el potencial osmótico registra la presencia de solutos disueltos en el sistema y el potencial matricial es una medida de la tendencia de la matriz a absorber agua adicionalmente por interacciones de las moléculas de agua en las interfases sólido y gas-líquido (efectos coloidales, capilares, etc.).

La medida del potencial hídrico total de las plantas se puede realizar mediante la cámara de presión, que desde su aparición es la técnica usada para la determinación del Ψ en campo (el funcionamiento de la misma se explica en el apartado 2.2.2.1). Con la cámara de presión se mide el potencial hídrico del xilema. El xilema es el tejido especializado en conducir el agua y las sales minerales desde el lugar de absorción al resto de tejidos de la planta. En el xilema las sales minerales se encuentran muy diluidas, por lo que en general el potencial osmótico puede despreciarse ($\Psi_s \approx -0,01$ MPa). Por lo tanto, se puede decir que el potencial hídrico de la planta es equivalente a la tensión que se genera en el interior de los conductos xilemáticos. De esta manera, midiendo con exactitud el potencial hídrico del xilema, se podrá determinar el potencial hídrico total de la planta.

1.2.2 Cierre estomático

Los estomas son la principal vía de intercambio gaseoso de las plantas. Sus mecanismos de apertura y cierre controlan las pérdidas de agua en situaciones de déficit hídrico (baja humedad del suelo o alta demanda evaporativa). Los mecanismos por los que el estrés hídrico induce el cierre estomático suelen ser señales hidráulicas, hormonales o una combinación de ambas. La contrapartida del cierre estomático, a la reducción de la pérdida de agua, es la reducción del flujo de CO_2 hacia el interior de las hojas, lo que implica una menor asimilación de carbono y con ello un menor crecimiento de la planta. El cierre estomático produce además un aumento de la temperatura de las hojas, debido a la reducción de la transpiración. La energía que no es empleada en evaporar el agua (calor latente) provoca un aumento de temperatura en las plantas, siendo ésta la base del uso de la temperatura de la vegetación para la monitorización del estrés hídrico en plantas

(Jackson *et al.*, 1977; Idso *et al.*, 1981; Jackson *et al.*, 1981), que ha sido ampliamente estudiado usando sensores de infrarrojo térmico.

1.3 OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE

Algunos estudios recientes de estimación de la temperatura de superficie con teledetección de alta y media resolución espacial demuestran que esta tecnología es capaz de proporcionar valores precisos de temperatura de superficie. Se han desarrollado varios algoritmos para la estimación de la temperatura de superficie a partir de los datos *at-sensor*, como son los métodos monocanal (Qin *et al.*, 2001), las técnicas *split-window* (Price, 1984; Becker y Li, 1990; Sobrino *et al.*, 1991; Prata, 1993; Sobrino *et al.*, 1994) o los métodos que usan m,as de un canal, como el método TES (Gillespie *et al.*, 1998). En Sobrino *et al.* (2002), Dash *et al.* (2002), Sobrino *et al.* (2004) y Kerr *et al.* (2004), entre otros, se puede encontrar una revisión de los métodos para la estimación de la temperatura de superficie. Todos estos trabajos demuestran el gran potencial que tiene la teledetección térmica para la obtención de la temperatura de la vegetación.

1.3.1 Ecuación monocanal

Los métodos para obtener temperatura de superficie (LST) a partir de datos de teledetección obtenidos en la parte del espectro térmico están basados en la ecuación de transferencia radiativa aplicada a la región del infrarrojo térmico dada por la ecuación:

$$L(\theta)_{\text{sensor},i} = L(\theta)_{\text{superfice},i} \tau(\theta)_i + L(\theta)_{\text{atm},i}^{\top}$$
[1.4]

donde θ es el ángulo de observación, τ_t es la transmisividad atmosférica en el canal i, $L^{\uparrow}_{atm,i}$ es la radiancia atmosférica ascendente en el canal i y $L_{superficie,i}$ es la radiancia observada en el canal i a nivel de suelo de acuerdo a:

$$L(\theta)_{\text{surface},i} = \varepsilon(\theta)_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon(\theta)_i) L(\theta)^{\downarrow}_{\text{atm},i}$$
[1.5]

en esta expresión, ε_i es la emisividad para el canal, $L_{atm,i}^{\downarrow}$ la radiancia atmosférica hemisférica descendente para el canal i, y $B_i(T_s)$ la radiancia emitida por un cuerpo negro (ε =1) a una temperatura T_s , definida por la ley de Planck:

$$B_{i}(T_{s}) = \frac{C_{1}}{\lambda_{i}^{5} \left[exp\left(\frac{C_{2}}{\lambda_{i}T_{s}}\right) - 1 \right]}$$
[1.6]

con $C_1 = 2hc^2 = 1.1911 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4 \text{ m}^2 \text{ s r}^{-1}$, $C_2 = (hc/k) = 1.43877 \times 10^4 \mu\text{m} \text{ K}$ (c es la velocidad de la luz y h la constante de Planck) y λ_i la longitud de onda efectiva (en μ m) definida por la ecuación:

$$\lambda_{i} = \frac{\int_{0}^{\infty} \lambda f_{i}(\lambda) d\lambda}{\int_{0}^{\infty} f_{i}(\lambda) d\lambda}$$
[1.7]

donde $f_i(\lambda)$ es la respuesta espectral del sensor en el canal i.

1.3.2 Método bicanal

La técnica bicanal (también llamada *split-window* cuando se aplica en la región de entre 10-13,5 μ m) está basada en el hecho de que la atenuación atmosférica producida en la radiancia emitida por la superficie, es proporcional a la diferencia entre las radiancias *at-sensor* medidas simultáneamente en dos canales térmicos diferentes (McMillin, 1975).

Se han publicado muchos trabajos en los que se aplica esta técnica para obtener la temperatura de la superficie del mar (Deschamps y Phulpin, 1980; McClain *et al.*, 1985; Sobrino *et al.*, 1993) y para obtener temperatura de superficie terrestre (Price, 1984; Becker y Li, 1990b; Sobrino *et al.*, 1991; Prata, 1993; Sobrino *et al.*, 1994).

En este trabajo, se ha propuesto el siguiente algoritmo que tiene en cuenta los efectos de la emisividad y del vapor de agua:

$$T_{s} = T_{i} + a_{1}(T_{i}-T_{j}) + a_{2}(T_{i}-T_{j})^{2} + a_{0} + (a_{3}+a_{4}W)(1-\varepsilon) + (a_{5}+a_{6}W)\Delta\varepsilon$$
[1.8]

donde T_s es la temperatura de superficie (en K), T_i y T_j son las temperaturas de brillo *at-sensor* de las bandas térmicas i y j (en K), $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$ y $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ son la emisividad media efectiva y la diferencia de emisividad, W es el vapor de agua

total atmosférico (en g/cm²) y a_k (k = 0,...,6) son los coeficientes numéricos del algoritmo bicanal. El procedimiento mediante el cual se han obtenido estos coeficientes y los resultados obtenidos con el algoritmo bicanal se muestran en la sección 3.2.3.

1.3.3 Método TES

El método TES (Temperature and Emissivity Separation) desarrollado por Gillespie *et al.* (1998) inicialmente para el sensor ASTER, permite obtener la emisividad además de la temperatura de superficie. Para su aplicación se necesitan un mínimo de cuatro canales térmicos. Los datos de entrada son radiancia de superficie R_{supi} y radiación atmosférica descendente L_{atmi}^{\downarrow} . El método TES es un método iterativo que usa tres módulos

Módulo NEM (Gillespie, 1985)

Para aplicar este módulo se asume una emisividad inicial para todas las bandas térmicas, ε_{max} , obteniéndose la temperatura y posteriormente un nuevo valor de emisividad.

Para ello, se calcula la radiancia R_i a partir de la radiancia de superficie (despejando la Ecuación 2.4):

$$R_{i} = Lsup_{i} - (1 - \varepsilon_{max}) L_{atmi}^{\downarrow}$$
[1.9]

Tras invertir la ley de Plank (Ecuación 2.5) para cada banda, la temperatura se toma como el valor máximo de las temperaturas obtenidas a partir de las radiancias para cada canal térmico i:

$$T_{\text{NEM}} = \max(T_i); T_i = \frac{C_2}{\lambda_i} \left[ln \left(\frac{C_1 \varepsilon_{\text{max}}}{R_i \lambda_i^{.5}} + l \right) \right]^{-1}; \varepsilon_i = R_i / B_i(T_{\text{NEM}})$$
[1.10]

Este proceso se repite hasta que el cambio en R_i entre dos iteraciones sea menor de 0,05 W m⁻² s r⁻¹µm⁻¹ o hasta que se hayan realizado 12 iteraciones.

Módulo RATIO

La emisividad relativa β i se obtiene dividiendo los valores de emisividad obtenidos con el modulo NEM entre el valor medio:

$$\beta i = \frac{\varepsilon_{NEM}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_{NEMi}}$$
[1.11]

Donde N es el número de canales térmicos.

Módulo MMD

A partir de las emisividades relativas obtenidas en el módulo anterior se obtienen las emisividades absolutas y con ellas la temperatura de superficie.

Para calcular la emisividad absoluta se parte de unas ecuaciones empíricas. Se calcula primero el contraste espectral (MMD)

$$MMD = \max(\beta i) - \min(\beta i), (i=1,N)$$
[1.12]

Donde max(β i) es el valor máximo de β para todas las bandas y min(β i) el valor mínimo.

La relación empírica obtenida entre MMD y ε_{min} para el sensor ASTER fue:

$$\varepsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \text{MMD}^{0.737}$$
 [1.13]

Finalmente el valor de la emisividad para cada canal se obtiene de la siguiente manera:

$$\varepsilon i = \beta i \left[\frac{\varepsilon_{\min}}{\min(\beta i)} \right]$$
[1.14]

Recalculándose la temperatura:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_i^*} \left[\ln \left(\frac{C_1 \varepsilon_i^*}{R_i^* \lambda_i^{*5}} + 1 \right) \right]^{-1}$$
[1.15]

**' Hace referencia al canal térmico para el cual la emisividad es máxima (por lo que la influencia debida a la radiación atmosférica descendente será mínima, ver Ecuación 1.4).

Finalmente se suele repetir por última vez el módulo NEM (1 iteración) el RATIO y el MMD con el fin de obtener más precisión.

1.4 MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA

Los valores medidos por un determinado sensor dependen de varios factores, como las características de la superficie (estructura de la vegetación, distribución de temperatura, propiedades ópticas), las propiedades de la atmósfera y las condiciones de observación. El uso de modelos nos puede permitir desagregar los distintos compones de la escena medida, permitiendo incluso obtener parámetros biofísicos de la superficie. En la región del infrarrojo térmico podemos considerar dos tipos de modelos: los modelos geométricos y los de transferencia radiativa.

Los modelos de transferencia radiativa (Kimes, 1980; Kimes *et al.*, 1980; Smith *et al.*, 1981; Prévot, 1985; McGuire *et al.*, 1989; Olioso, 1995; François *et al.*, 1997; Olioso *et al.*, 1999; Luquet *et al.*, 2001; Luquet, 2002; etc...) calculan la radiancia en función del ángulo de observación, la distribución de temperatura y la distribución de ángulos de las hojas dentro de la cobertura vegetal. Estos modelos simulan la propagación y las interacciones con la vegetación de la radiancia en el infrarrojo térmico emitida por los componentes de la cobertura vegetal o proveniente de la atmósfera. La vegetación viene representada mediante elementos planos distribuidos en capas horizontales homogéneas. Las contribuciones

ascendente y descendente de cada capa se basan en el concepto de frecuencia de GAP direccional a través de la vegetación. La radiancia direccional de la cubierta se calcula sumando las contribuciones radiativas de todas las capas, realizándose iteraciones para tener en cuenta la reflexión múltiple dentro de la cubierta. El problema de estos modelos es que no tienen en cuenta la arquitectura tridimensional ya que están desarrollados para cultivos homogéneos.

1.4.1 Modelo 3-D DART

El modelo DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) ha sido desarrollado por Guillevic *et al.* (2003), y es una extensión a la región del infrarrojo térmico del modelo originariamente desarrollado por Gastellu-Etchegorry *et al.* (1999) para la región de onda corta. Este modelo simula la transferencia radiativa en el infrarrojo térmico dentro de coberturas vegetales heterogéneas, caracterizadas por su estructura tridimensional. El modelo predice la radiancia direccional de la superfície y la distribución del balance de energía térmica dentro de la cobertura vegetal para determinadas bandas o bien para todo el espectro de emisión. También puede simular imágenes direccionales de teledetección.

La principal originalidad del modelo DART es que tiene en cuenta la distribución tridimensional de las características de los elementos de una determinada escena: densidad de vegetación, propiedades ópticas y temperaturas termodinámicas. La simulación correspondiente a la transferencia radiativa se realiza principalmente a través de tres pasos: 1) la emisión y propagación de la radiación de una determinada superficie a través de la cobertura vegetal, 2) la emisión y propagación de la radiancia atmosférica descendente entre la vegetación y 3) la dispersión múltiple de la radiación interceptada por la vegetación. La propagación de la radiación se describe mediante la aproximación de rayos junto con el método de ordenadas discretas.

En este modelo se considera que una determinada escena está dividida en celdas rectangulares de dimensión variable. Cada celda representa un determinado componente como por ejemplo hojas de los árboles, hierba, tronco, suelo, agua, etc.
Los principales parámetros necesarios para describir la arquitectura de la cobertura vegetal son la densidad de árboles, junto con su forma y dimensión, y la topografía. El contenido de información correspondiente a cada celda es específico y constante dentro de esa celda. Las celdas correspondientes a hojas (bien de árboles o bien de hierba) vienen caracterizadas por su temperatura termodinámica, la emisividad espectral, la densidad de área foliar y la distribución de ángulos de las hojas. Las celdas correspondientes a tronco y suelo vienen descritas por su temperatura termodinámica y su emisividad espectral. Las hojas vienen representadas como pequeños elementos planos aleatoriamente distribuidas dentro de las celdas. Desde un punto de vista radiativo, las celdas formadas por hojas corresponden a un medio turbio, dando lugar a procesos de interacción en un volumen, mientras que el suelo se representa mediante un medio opaco, dando lugar a interacciones en superficie únicamente.

La distribución de temperatura viene determinada tanto por factores medioambientales externos (condiciones de la atmósfera, el suelo y el agua) como por factores internos de las plantas. En su versión actual, el modelo DART no resuelve los balances de agua y energía dentro de la cobertura vegetal, lo que implica que la distribución tridimensional de las temperaturas termodinámicas dentro de esta cobertura tiene que ser especificada. En el modelo existen dos formas alternativas de especificar la distribución de temperaturas. Así, cada tipo de componente (suelo, hierba, árboles, etc.) puede ser representado por (1) una temperatura constante dentro de la cobertura o (2) un rango de temperaturas caracterizando la temperatura del elemento en zonas de sol y sombra.

Como se ha comentado anteriormente, el modelo DART se basa en el método de ordenadas discretas, es decir, la radiación puede propagarse únicamente a lo largo de unas ciertas direcciones discretas, N_{dir}. Una dirección particular Ω_n viene caracterizada por su ángulo cenital θ_n y su ángulo acimutal φ_n . Esta dirección estará asociada con un determinado sector angular $\Delta\Omega_n$ definido por un rango del ángulo cenital $\Delta\varphi_n$. Por lo tanto, el ángulo sólido vendrá definido por:

$$\Delta\Omega_n = \int_{\Delta\varphi_n} \int_{\Delta\theta_n} \left| d\,\mu_n \right| d\,\varphi_n \tag{1.16}$$

 $con \mu_n = cos \theta_n y siendo:$

$$\sum_{n=1}^{N_{dir}} \Delta \Omega_n = 4\pi$$
 [1.17]

De esta forma, una determinada dirección Ω_n vendrá especificada por el vector (θ_n , ϕ_n , $\Delta\Omega_n$).

En primer lugar, el modelo de transferencia radiativa calcula la emisión de cada celda, así como la propagación e interceptación de la radiación emitida dentro de la cobertura vegetal. La emisión de una celda depende de las características ópticas y de la estructura de cada uno de los elementos que la forman. Las leyes de emisión utilizadas son las conocidas leyes de Planck y de Stefan-Boltzmann, teniendo en cuenta el factor de emisividad, debido a que las superficies naturales no se comportan exactamente como cuerpos negros.

La radiación atmosférica descendente es considerada como isótropica. Puede ser introducida directamente como un dato de entrada más o bien calculada a partir de los modelos de Berger (1988) o Brutsaert (1975), en los que se requiere del conocimiento de la temperatura y la humedad del aire a una altura de 2 metros sobre el suelo.

Durante la propagación dentro de la cobertura vegetal, los flujos radiativos interaccionan con las celdas individuales. Los procesos de interacción dentro de una celda dependen de la naturaleza de dicha celda (propiedades ópticas y estructurales). La radiación incidente es transmitida a través de celdas vacías, totalmente interceptada por celdas opacas (suelo, agua, etc.) o parcialmente atenuada por celdas semiopacas (tronco, hojas, etc.). La propagación se detiene cuando los flujos radiativos son totalmente interceptados por los elementos que forman la cobertura vegetal o cuando la radiación escapa de las celdas más superficiales de la escena considerada. La radiación interceptada se calcula a través del camino de propagación exacto dentro de la celda. Posteriormente, esta radiación es dispersada. Se realiza un proceso iterativo para tener en cuenta la

dispersión múltiple dentro de la cobertura vegetal. La radiación que escapa de las celdas superiores de la escena se almacena en cada iteración, contribuyendo a la radiancia ascendente que proviene de la escena. Normalmente se suele alcanzar una convergencia con tan sólo dos iteraciones, debido a la baja reflectividad de las superficies naturales en la región del infrarrojo térmico.

La validación del modelo puede encontrarse en Gillevic *et al.* (2003). Señalaremos aquí que la comparación del modelo DART con el modelo bidimensional de Prévot (1985) proporciona unos resultados similares, aunque el modelo DART tiende a sobrestimar la temperatura de brillo para ángulos de observación grandes y a subestimarla para valores pequeños. Las diferencias entre ambos modelos se deben básicamente al hecho de que utilizan diferentes aproximaciones para simular la dispersión de las hojas. El modelo DART se considera como más preciso en su representación de la dispersión múltiple. Aún así, se hace necesario el estudio de su comportamiento para distribuciones tridimensionales.

Capítulo 2

Detección del estrés hídrico en árboles mediante instrumentación

2.1 INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico en los cultivos se produce cuando la demanda atmosférica supera el suministro de agua desde el suelo (Slatyer, 1967), originando un descenso del potencial hídrico de la planta y afectándose negativamente el funcionamiento de los procesos fisiológicos, principalmente la expansión foliar y la fotosíntesis (Hsiao, 1973). Entre los métodos de medida del estado hídrico de las plantas (Turner, 1981), el potencial hídrico (Ψ) es mejor indicador del estado hídrico de la planta que su contenido relativo de agua (CRA), por ser mayor su sensibilidad, es decir pequeños cambios en el CRA de la hoja corresponden a grandes cambios en el Ψ foliar (Acevedo et al., 1979; Kramer y Boyer, 1995). La medida del potencial hídrico de las plantas es además un indicador de estrés hídrico más fiable que el contenido de humedad del suelo (Cowan, 1965; Slatyer, 1967; Turner, 1990). Una desventaja de la medida del potencial hídrico en árboles es el tiempo empleado en la medida de cada uno de los árboles. Además, el comportamiento dinámico del potencial hídrico hace difícil determinar el momento del día óptimo de medida, aunque en días soleados el potencial hídrico foliar es relativamente constante en las horas centrales del día, cuando alcanza sus valores mínimos como consecuencia de la mayor demanda evaporativa (Kramer y Boyer, 1995). Shackel et al. (1997) mostraron que el potencial hídrico del tallo es una medida mucho menos variable y más útil que el Y foliar para la medida del estrés hídrico en árboles. Aún así, el

número de medidas de Ψ del tallo que se pueden hacer en un mismo período de medidas es muy limitado (Stimson *et al.*, 2005).

Cuando una planta sometida a estrés hídrico cierra estomas para evitar su deshidratación, la temperatura de la vegetación aumenta, debido a una reducción del enfriamiento por la menor transpiración. Esta es la base del uso de la temperatura de la cubierta para la monitorización del estrés hídrico en plantas (Jackson et al., 1977; Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981). De esta manera, el estrés hídrico ha sido ampliamente estudiado usando sensores de infrarrojo térmico (IRT), sobretodo en cultivos herbáceos, como la cebada (Tubaileh et al., 1986), el trigo (Pinter et al., 1990), el maíz o el algodón (Reicosky et al., 1995; Wanjura y Upchruch, 2000). Desde que Tanner (1963) usó termómetros de infrarrojo para determinar la temperatura del cultivo en patatas, observando su potencialidad para determinar el estado hídrico del cultivo, esta metodología ha sido ampliamente estudiada buscando distintos índices que pudieran cuantificar el grado de estrés hídrico del cultivo. Jackson et al. (1977) usaron la temperatura de la vegetación (Tc) menos la temperatura del aire (Ta) como índice de estrés. Este índice en estudios posteriores se normalizó con respecto al déficit de presión de vapor (DPV), obteniéndose el índice de estrés hídrico del cultivo, crop water stress index (CWSI) en inglés, (Idso et al., 1981, Jackson et al., 1981). Entre otros estudios, esta metodología (CWSI) se ha utilizado para la estimación de la conductancia estomática bajodistintos tratamientos de riego (Jones, 1999). Más recientemente se encuentran estudios en esta línea pero utilizando cámaras térmicas (Leinonen y Jones, 2004; Cohen et al., 2005) y usando las imágenes térmicas para detectar distintos niveles de estrés hídrico, calculando el CWSI y relacionándolo con la conductancia estomática y el potencial hídrico del xilema (Möller et al., 2007). Hay que señalar que aunque el uso de sensores térmicos puntuales ha sido ampliamente utilizado en distintos cultivos, éstos han sido en su mayoría cultivos herbáceos, donde la influencia del suelo y de la arquitectura del cultivo es pequeña, esto mismo ocurre con la nueva tendencia del uso de cámaras térmicas.

En este capítulo se ha hecho un amplio estudio de la detección del estrés hídrico en árboles frutales, en el que se han medido parámetros relacionados con procesos fisiológicos, como el potencial hídrico, la conductancia estomática y la asimilación de carbono, para poder caracterizar el grado de estrés hídrico alcanzado

por los cultivos estudiados (olivar y melocotonero) sometidos a distintos tratamientos de riego. Simultáneamente se ha evaluado la capacidad de la temperatura de la cubierta para la detección del grado de estrés hídrico a nivel de árbol, utilizando sensores de infrarrojo térmico ubicados sobre las copas de los árboles, una pistola térmica y una cámara térmica.

2.2 EXPERIMENTOS DE CAMPO

2.2.1 Descripción y localización de los experimentos

2.2.1.1 Parcela de olivar

El experimento tuvo lugar en una parcela de 4 ha de superficie en la finca *Alameda del Obispo*, perteneciente al Centro de Investigación y Formación Agraria (C.I.F.A.) de Córdoba, situada a 37.5°N, 4.8°O, altitud 110 m, durante los meses de junio a noviembre de los años 2004 y 2005. El clima de la zona es típicamente mediterráneo, con una precipitación media anual de alrededor de 600 mm, concentrada en los meses desde otoño a primavera, con sequía estival. La evapotranspiración de referencia (ETo) media anual es de 1390 mm, obtenida con la ecuación de Penman-Monteith (Testi, 2003). El suelo de la parcela experimental se clasifica como *Typic Xerofluvent* (USDA, Soil Conservation Service, 1975), correspondiente a un suelo de textura franco-arenosa, de origen aluvial, y con una capa de arenisca situada aproximadamente a 1,50 m de profundidad. El suelo alcanza un contenido de agua de 0,23 m³ m⁻³ en el límite superior (LS) de almacenamiento y de 0,07 m³ m⁻³ en el límite inferior (LI) (Testi, 2003).

La variedad de olivo es 'Arbequino', los árboles se plantaron en 1997 a un marco de 3,5 m x 7,0 m (408 árboles ha^{-1}) y con orientación N-S. Debido al drenaje superficial de la parcela y su baja tasa de infiltración, los olivos están plantados sobre caballones para evitar problemas de encharcamiento. El sistema de mantenimiento del suelo es de no laboreo, con uso de herbicidas para el control de malas hierbas. El sistema de riego empleado es por goteo, permitiendo variar la dosis de riego dentro de la misma área experimental. En la Figura 2.1 podemos observar una fotografía de los olivos utilizados en el estudio.



Figura 2.1 Detalle de los olivos utilizados en el estudio.

El experimento se realizó en un área de 6 filas de 18 olivos cada una, (parcela experimental de 2646 m²). Se aplicaron tres tratamientos de riego (Tabla 2.1), con tres repeticiones, distribuidos de forma aleatoria sobre la parcela experimental, con el objeto de obtener distintos niveles de estrés hídrico en el cultivo. Dos de los tratamientos fueron de riego deficitario (S1 y S2) y uno se regó para satisfacer las necesidades hídricas (ET) del cultivo (tratamiento control, R).

Tratamiento de riego	Dosis aplicada	Periodo de aplicación
R	100 % ET	mitad de junio-mitad de octubre
S1	25 % ET	mitad de junio-mitad de octubre
52	43 % ET	mitad de junio-primera semana de julio, y primera semana de septiembre-mitad de octubre
52	sin riego	desde la primera semana de julio a la primera semana de septiembre

Tabla 2.1 Tratamientos de riego aplicados en la zona de olivar durante las campañas de los años 2004 y 2005.

Los árboles centrales de cada una de las parcelas elementales correspondientes a cada tratamiento fueron monitorizados semanalmente para la caracterización del estado fisiológico de cada árbol. Se midió de forma continua la temperatura de la copa (Tc) en diez árboles (3 bajo tratamiento deficitario S1, 4 bajo tratamiento deficitario S2 y 3 bajo tratamiento control R) mediante sensores cenitales, realizando un seguimiento semanal del nivel de estrés hídrico del cultivo mediante la medida del potencial hídrico del tallo (Ψ_s) en 11 árboles (4 por tratamiento para S1 y S2, y 3 árboles en el tratamiento R). De entre los 11 árboles se escogieron dos por cada tratamiento de riego para la realización de medidas semanales de conductancia estomática e intercambio de carbono. Tomándose, también, semanalmente medidas puntuales de temperatura de cada una de las copas de los árboles bajo tratamiento (106 árboles).

En la Figura 2.2 se puede observar la parcela de estudio (Figura 2.2 a) y el detalle de la parcela experimental (Figura 2.2 b) donde están identificadas las distintas repeticiones de cada tratamiento de riego. Estas imágenes fueron adquiridas con el sensor aerotransportado AHS, al que nos referiremos más adelante.



(a)



Figura 2.2 a) Imagen de la parcela de olivar con la zona experimental enmarcada con un rectángulo amarillo. b) Detalle de la parcela experimental donde están localizadas las distintas repeticiones de cada tratamiento de riego.

2.2.1.2 Zona de melocotonero

El experimento se realizó en una plantación de melocotonero (*Prunus persica* L., cv. 'Baby Gold-8') de 3 ha, en una explotación comercial situada en el Valle del Guadalquivir (Finca *La Veguilla*, Almodóvar del Río, Córdoba; 37,8°N, 4,8°O). Los árboles fueron plantados en 1993 con un marco de 5 m x 3,25 m, sobre un suelo profundo de textura franca a franco-arcillosa. En la actualidad, los árboles tienen un tamaño medio de copa de 25 m³, con forma aproximadamente esférica, y una altura de aproximadamente 4 m. La parcela experimental fue de 6 filas de 32 árboles cada una (3120 m²). Se aplicaron cuatro tratamientos de riego (Tabla 2.2), con cuatro repeticiones, con 12 árboles por parcela elemental (3 filas de 4 árboles). De cada una de las parcelas elementales se monitorizaron los dos árboles centrales, tomándose medidas semanales de temperatura de copa y de potencial hídrico.



Figura 2.2 Detalle de los melocotoneros utilizados en el estudio

Tabla 2.2 Tratamientos de riego aplicados sobre la zona de melocotonero en las campañas de verano de los años 2004 y 2005.

Tratamiento de riego	Dosis aplicadas	Periodo de aplicación	
	Sin riego	primera semana de mayo-última semana de junio, y mitad de agosto-mitad de septiembr	
А	= 2 C	primeras dos semanas de julio *	
	= C	mitad de julio-mitad de agosto.	
В	2/3 C	primera semana de mayo–mitad de septiembre.	
С	Control primera semana de mayo-mitad de (aprox. 100% ET) septiembre.		
D	4/3 C	primera semana de mayo– mitad de septiembre.	

* Inicio de la fase III de crecimiento del fruto (Mitchell and Chalmers, 1982)

En la Figura 2.4 se puede observar la parcela de estudio (Figura 2.4 a) y el detalle de la parcela experimental (Figura 2.4 b) donde están señalados los distintos bloques o parcelas elementales de cada tratamiento.



Figura 2.4 a) Imagen de la parcela de melocotoneros tomada con el sensor aerotransportado AHS, con la zona del estudio señalada con un rectángulo amarillo. b) Detalle de la parcela experimental donde están señaladas las parcelas elementales de cada tratamiento.

2.2.2 Medidas 'in situ' relacionadas con el estrés hídrico

2.2.2.1 Potencial hídrico

El seguimiento del estado hídrico de los árboles se llevó a cabo mediante medidas del potencial hídrico del tallo (Ψ_s), realizadas al medio día solar (14:00 hora local) en hojas sombreadas y cercanas al tronco (Shackel *et al.*, 1997). Las medidas se realizaron mediante bomba de presión (Scholander *et al.*, 1965), (Soil moisture equipment Corp., PWSC Model 3000, EE.UU.) En olivar se monitorizaron 11 árboles con distinto grado de estrés según las tres dosis de riego aplicadas (4 bajo tratamiento deficitario S1, 4 bajo tratamiento deficitario S2, y 2 bajo tratamiento control R), midiéndose el potencial en dos hojas por árbol. En melocotonero se midió en una hoja por árbol, en 32 árboles (8 por tratamiento).

Desde su aparición, la cámara de presión es el instrumento generalmente usado para la determinación del potencial hídrico de las plantas, ya que permite hacer medidas en el campo con bastante rapidez y fiabilidad. El funcionamiento de esta bomba consiste en aplicar presión a la hoja hasta que la savia retenida en el xilema aparece en el exterior de los vasos xilemáticos. Esto se debe a la tensión negativa en el xilema de las plantas; así, cuando el pecíolo de las hojas se corta, la columna de agua se retracta en su interior debido a que el agua está bajo tensión. En este método se corta una hoja y se introduce en una cámara dejando fuera el pecíolo. Posteriormente se sella la cámara y se aplica un gas a presión que provocará que el agua retenida en el xilema sea expulsada hasta el corte del pecíolo, midiendo la presión con un manómetro. La lectura del manómetro representa la tensión a la que se encontraba la savia en el xilema antes de la escisión de la hoja pudiéndose considerar equivalente al potencial hídrico de la planta (Boyer, 1976).

2.2.2.2 Conductancia estomática

La conductancia estomática se midió mediante porometría, utilizando el porómetro PMR-4 (PP Systems, Hitchin Herts, Gran Bretaña). En el estudio y la medición de la conductancia estomática es necesario tener en cuenta la complejidad de la regulación de la apertura estomática, ya que los estomas responden a influencias ambientales (luz, humedad, temperatura, CO₂) y endógenas (producción y liberación de hormonas en raíz y hojas). La sensibilidad de los

estomas a las condiciones ambientales puede provocar, en las mediciones de campo especialmente, importantes variaciones de la conductancia en cortos intervalos de tiempo, dificultando la obtención de medidas precisas. Para minimizar estos efectos y obtener lecturas representativas, es necesario realizar las mediciones de conductancia estomática en condiciones meteorológicas de días despejados y secos. Las medidas de conductancia se realizaron en olivar en tres árboles, uno por cada tratamiento de riego, en los que se etiquetaron cinco hojas soleadas por árbol de las que se hizo un seguimiento semanal, midiéndose cada hoja a las 9:30, 10:30, 11:30 y 13:30 hora local (lo que corresponde a las 7:30, 8:30, 9:30 y 11:30 GMT) durante el verano de 2004 y a las 10:30 GMT durante el verano de 2005.

2.2.2.3 Fotosíntesis

Las medidas de fotosíntesis foliar se realizaron utilizando un sistema abierto de intercambio de gases: CIRAS-1 (PP Systems, Hitchin Herts, Gran Bretaña). Este es un sistema abierto de intercambio de gases que dispone de cuatro analizadores simultáneos. Dos de ellos miden, respectivamente, la concentración de CO_2 y la humedad relativa del aire de referencia (aire que entra en la cámara), y los otros dos miden dichas variables en el aire de análisis (aire que sale de la cámara). Dispone de dos bombas internas con medidores de flujo con masas para mantener un flujo constante de aire a través del sistema, condición necesaria para poder realizar correctamente los cálculos de los distintos parámetros. El analizador va alojado en la unidad principal del sistema, donde también se encuentran el desecante de vapor de agua, el absorbente de CO_2 y un filtro de micropartículas. Una pequeña bombona recambiable aporta el CO_2 necesario.

Estas medidas se realizaron en olivar, para las cuales se monitorizaron 6 árboles (2 por tratamiento), etiquetándose dos hojas expuestas al sol por cada árbol, a las cuales se les hizo un seguimiento semanal, midiéndose cada hoja a tres horas del día: 8:30, 9:30 y 12:00 GMT, durante el verano de 2004.

2.2.2.4 Temperatura de la copa

2.2.2.4.1 Sensores térmicos

Para la estimación de la temperatura a nivel de copa se monitorizaron diez árboles en la parcela de olivar (3 bajo tratamiento deficitario S1, 4 bajo tratamiento deficitario S2 y 3 bajo tratamiento control R), colocándose de manera permanente sensores de radiación infrarroja IRTS-P (Apogee, UT, USA) sobre las copas de los olivos, y midiendo la radiación térmica en el rango espectral de 6,5-14 μ m. Dichos sensores fueron colocados un metro por encima de la copa, diseñando unos postes de seis metros de altura en los que, por medio de un brazo metálico, se instaló cada sensor de forma permanente aproximadamente en el centro de cada copa (Figura 2.5).



Figura 2.5 Colocación y diseño de los sensores de temperatura IRTS-P sobre las copas.

Los sensores de infrarrojo IRTS-P utilizados realizan una medida integrada de la copa con un campo de visión de 52°, midiendo la temperatura de brillo, es decir, la temperatura que tendría la muestra si fuese un cuerpo negro ideal, por eso fue necesario medir la emisividad de las copas de los olivos del estudio. La temperatura de superficie se calculó según las Ecuaciones 1.4 y 1.5.

La emisividad de cada uno de los olivos se obtuvo aplicando el método TES (Temperature Emissivity Separation) (Gillespie *et al.*, 1998) a la información rediométrica obtenida con un radiómetro espectral CIMEL CE 312 (CIMEL Electronique, París, Francia). El radiómetro se situó usando una grúa a la misma altura a la que estaban situados los sensores de infrarrojo como podemos ver en las Figuras 2.6 y 2.7.



Figura 2.6 Medida de la emisividad de uno de los olivos



Figura 2.7 Imagen del radiómetro CIMEL CE 312 y de un sensor IRTS-P

El CIMEL CE 312 es un radiómetro que mide la radiancia que emiten los cuerpos en 6 bandas de longitudes de onda del infrarrojo térmico, cinco de ellas son las bandas del sensor ASTER, a bordo del satélite TERRA (Banda10: 8.1-8.5 μ m, Banda 11: 8.5-8.9 μ m, Banda 12: 8.9-9.3 μ m, Banda 13: 10.3-11 μ m, Banda 14: 11-11.7 μ m) y la otra es una banda ancha de un rango espectral de 8-13 μ m.

Antes de su colocación sobre la parcela experimental, los sensores fueron calibrados según se explica en el Apartado 2.2.2.4.2.

Además de las medidas con los sensores de radiación infrarroja ubicados sobre las copas, se tomaron medidas semanales de temperatura de brillo con un sensor de infrarrojo térmico de mano o pistola térmica (modelo Raynger II, Raytek, California, USA), de una sola banda de 8-14 μ m de rango. Este sensor fue usado para medir la temperatura a las 12:00 GMT, de los olivos en el verano de 2004 y 2005 y de los melocotoneros en el verano de 2005.

Además de medir la temperatura de superficie de las copas de los árboles, se tomaron continuamente medidas de temperatura del aire (Ta) (cada cinco minutos durante toda la campaña) con una Vaisala Weather Transmitter (model WXT510, Vaisala Ojy, Helsinki, Finland) instalada en la zona de estudio a 1 m por encima de los árboles (6 m por encima del suelo).

2.2.2.4.2. Calibrado

Se realizaron una serie de pruebas para evaluar los 12 sensores IRTS-P (Figura 2.8). Se sujetaron todos los sensores a un pequeño poste en forma de T, de 70 cm de altura mantenido por un trípode, de manera que todos enfocaban la misma área de 25 cm de radio de un recipiente de 5 cm de profundidad con agua. El dispositivo se dejó calentar a lo largo de toda la mañana en el exterior, a temperatura ambiente. Sobre el agua se colocó un termopar de tipo K al nivel superficial. Los sensores y el termopar estaban conectados a tres datalogger Campbell CR10X que almacenaron los datos de temperatura, promediados cada 5 minutos.



Figura 2.8 Colocación de los sensores de infrarrojo para su calibración

Los IRTS-P se ven afectados por la variación de su temperatura, por lo que tienen en su interior un cuerpo de calibración a partir del cual se corrige la temperatura minimizándose esta fuente de error. Para ello los sensores IRTS-P tienen dos salidas de temperatura, la del cuerpo de calibración y la del cuerpo que se quiere medir.

Para el agua se asumió una emisividad de 0,98 (Robinson y Davies, 1972) y para la atmósfera una temperatura radiométrica de -40°, que es un valor típico de la atmósfera para la banda espectral en la que trabaja el IRTS-P (6,5-14 μ m). Los datos de temperatura radiométrica para el rango de 25-40°C se corrigieron usando la ecuación de transferencia radiativa (Ecuación 1.3) y asumiendo, por la cercanía de la muestra, una transmisividad de 1. Cada cinco minutos obtuvimos trece datos (una medida por sensor IRTS-P y la temperatura del termopar) permitiendo calcular la desviación estándar de las medidas de los IRT con respecto a la temperatura medida por el termopar (Figura 2.9). Se puede observar cómo la desviación aumenta con la temperatura, variando de 0,1 a 0,3 °C.





Figura 2.9 Temperatura medida por el termopar y temperatura de superficie obtenida de las medidas de los IRTS-P aplicando la ecuación de la transferencia radiativa.



Figura 2.10 Desviación estándar de la medida de la temperatura de los 12 sensores IRTS-P respecto a la temperatura medida por el termopar.

Los resultados de este análisis de errores se observan en la Tabla 2.3, asumiendo RMSD como error significativo del comportamiento de los IRTS-P en el rango de temperaturas en el que se ha trabajado (de 25 a 40 °C) para un número de medidas N=80 para cada sensor. Este error coincide con el esperado por las

características de los IRTS-P (Apogee, www.apogee-inst.com) de +/-0,4 °C para un intervalo de temperaturas de entre 5 y 40 °C.

n	DMCE	D :	
Sensor	RMSE	Bias	RMSD
IRTS-PA1	0.06	0.5	0.50
IRTS-P A2	0.06	0.4	0.40
IRTS-P A3	0.06	0.5	0.50
IRTS-P A4	0.06	0.3	0.31
IRTS-P B1	0.06	0.5	0.50
IRTS-P B2	0.06	0.4	0.40
IRTS-P B3	0.05	0.4	0.40
IRTS-P B4	0.03	0.2	0.20
IRTS-P C1	0.06	0.5	0.50
IRTS-P C2	0.07	0.5	0.50
IRTS-P C3	0.04	0.3	0.30
IRTS-P C4	0.03	0.2	0.20

Tabla 2.3: Estudio del error de cada uno de los IRTS-P con respecto a la medida del termopar para el rango de temperaturas entre 25 y 40 $^{\circ}$ C (N=80).

El calibrado del radiómetro de mano Raynger (pistola térmica) se realizó usando una fuente de calibrado de temperatura constante GALAI 204-P (Galai Productions Ltd, Midgad Haemek, Israel). Se puede observar cómo se llevó a cabo la calibración en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Imagen de la calibración de la pistola Raynger con un cuerpo negro de temperatura regulable.

Se hizo oscilar la temperatura del cuerpo negro entre 15 y 65 °C, un intervalo de temperaturas con límites que incluyen las que se podrían encontrar en el campo. Como resultado de la calibración, se obtuvo la Figura 2.12 que muestra como el radiómetro Raynger responde correctamente a las variaciones de temperatura marcadas.



Figura 2.12 Relación entre la temperatura medida con el radiómetro Raynger y la marcada por el cuerpo negro.

2.2.2.4.3 Cámara térmica

Una cámara térmica (Snapshot, Infrared Solutions Inc., MN, USA) fue usada para adquirir imágenes de temperatura de los olivos bajo los distintos tratamientos de riego. Las imágenes fueron tomadas a las 15:00 GMT el día 4 de octubre del 2004.

La cámara térmica trabaja con una sola banda dentro del rango espectral de 8 a 14 μ m, con un ángulo de visión (FOV) de 17,5°. Las imágenes se tomaron del lateral de la copa, simultáneamente con medidas de temperatura puntuales tomadas con el sensor de infrarrojo de mano.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Seguimiento de datos 'in situ'

2.3.1.1 Potencial hídrico

El potencial hídrico mostró el estado hídrico de los árboles y los niveles de estrés hídrico originados por los distintos tratamientos de riego. En el caso del olivar, el potencial hídrico del tallo (Ψ s) osciló entre -0,6 y -3,3 MPa, en el verano de 2004, y entre -0,9 y -5 MPa, en el verano de 2005, siendo los valores más bajos los que corresponden a los árboles de los tratamientos de riego deficitarios. La figura 2.13 muestra la evolución semanal del potencial hídrico de los árboles individuales (Figura 2.13a) y los valores medios para cada tratamiento (Figura 2.13b) durante el verano y otoño de 2004. La figura 2.14 muestra la evolución semanal durante el verano de 2005. Los valores más negativos de potencial hídrico, en el 2004, correspondieron a árboles del tratamiento de riego deficitario S1, alcanzando diferencias de más de -2 MPa respecto al tratamiento control R. Durante el verano de 2005, árboles del tratamiento S2 alcanzaron diferencias cercanas a -4 MPa con respecto al tratamiento regado; aunque en ambos años el tratamiento S1 fue el que mostró un mayor déficit hídrico (Figuras 2.13 y 2.14). Las mayores diferencias en 2004 se observaron a principios de octubre, justo antes de las primeras lluvias otoñales con las que empieza la recuperación hídrica de los árboles bajo riego deficitario. En ambos años, los árboles del tratamiento regado (R) mostraron un Ψ s, a lo largo de todo el período de medidas, de alrededor de -1 MPa.



Figura 2.13 Evolución semanal del potencial hídrico del tallo, para cada olivo individual (a) y valores medios para cada tratamiento de riego (b), durante el verano y otoño de 2004.



Figura 2.14 Evolución semanal del potencial hídrico del tallo, para cada olivo individual (a) y valores medios para cada tratamiento de riego (b), durante el verano de 2005.

En melocotonero, también se observaron diferencias en el potencial hídrico entre árboles sometidos a los distintos tratamientos de riego. Se puede observar como los árboles del tratamiento de riego deficitario controlado (RDC, o tratamiento A) responden a la variación en la dosis de riego aplicada (Tabla 2.2), observándose la recuperación del Ψ s a principios de julio, cuando empiezan a regarse los árboles (aplicando al inicio del riego una dosis doble que en el tratamiento control) y la caída del Ys que se produce desde mitad de agosto, cuando se vuelve a suspender el riego. Se observa (Figura 2.15) como el tratamiento de riego deficitario sostenido (RDS o B) presenta valores de Ψ s, durante todo el período de riego, inferiores a los tratamientos control (C) y excedentario (D); éstos durante el año 2004 mantienen valores de Ψs hasta cosecha (mitad de agosto) de alrededor de -0.5 MPa, sin apenas diferencias entre ambos tratamientos hasta el final del período de riego (mitad de septiembre). Durante el año 2005 se alcanzaron valores de Ys más bajos que en el 2004, excepto en el tratamiento excedentario que se mantuvo con valores alrededor de -0.5 MPa hasta la cosecha.



a) b) **Figura 2.15** Evolución semanal del potencial hídrico en los melocotones, para cada tratamiento de riego: (a) en el año 2004 y (b) en el año 2005.

2.3.2.2 Conductancia estomática

Las medidas de conductancia estomática realizadas en un árbol por cada tratamiento de riego, en olivar, mostraron diferencias entre tratamientos, con valores de conductancia menores en los árboles bajo tratamientos de riego deficitarios, S1 y S2. En la Figura 2.16 se muestra la evolución diurna del comportamiento estomático en tres árboles con distinto nivel de estrés hídrico, el día 5 de agosto del 2004, fecha en que el potencial hídrico al mediodía en dichos árboles fue de -2,2 MPa (S1), -1,1 MPa (S2) y -0,9 MPa (R), siguiendo los valores de conductancia diaria la misma tendencia.

Las medidas diarias de conductancia estomática realizadas durante el verano de 2004 mostraron un máximo sobre las 8:30 GMT, produciéndose a partir de este momento un descenso de la conductancia. A lo largo del día, conforme aumenta el estrés hídrico (menor Ψ s) la conductancia estomática decrece (en las 3 horas en que se realizaron las medidas; Figura 2.16), observándose valores de conductancia muy inferiores en el tratamiento S1, respecto a los tratamientos S2 y R. La evolución temporal de la conductancia estomática, medida en los tres árboles con distinto nivel de estrés hídrico a las 11:00 GMT (Figura 2.17), muestra diferencias en la conductancia estomática entre los tres árboles, que se mantienen durante todo el periodo de medidas, y que se relacionan con el estrés hídrico de cada árbol; observándose una recuperación de la conductancia al final, con la recuperación hídrica de los árboles después de las primeras lluvias otoñales.



Figura 2.16 Evolución diurna de la conductancia estomática en tres árboles con distintos tratamientos de riego, para el día 5 de agosto de 2004.



Figura 2.17 Evolución estacional de la conductancia estomática en tres árboles con distinto nivel de estrés hídrico (R, S1, S2), las medidas fueron tomadas a las 11:00 GMT (b).

También en el año 2005 los valores de la conductancia estomática reflejaron las diferencias debidas a los distintos tratamientos de riego aplicados. La Tabla 2.4 muestra los valores de conductancia estomática obtenidos al inicio del período de riego y en el momento de máximo estrés hídrico, comparados con los de potencial hídrico. Los valores de la conductancia fueron menores en los árboles bajo tratamientos de riego deficitario (S1 y S2), observándose un incremento en las diferencias entre los valores correspondientes a los árboles sometidos a los distintos tratamientos conforme avanzó la estación.

Tratamientos	Comienzo de los tratamientos		Periodo de máximo estrés hídrico	
de Riego	Ψ (MPa)	g_s (mm s ⁻¹)	Ψ (MPa)	g_s (mm s ⁻¹)
S1 (1/4 ET)	-1.4	4.6	-3.5	1.5
S2 (1/4 ET)	-1.1	13.6	-3.1	3.0
R (ET)	-0.9	12.9	-1.2	5.0

Tabla 2.4 Potencial hídrico (Ψ) y conductancia estomática (g_s) medidos en el año 2005 a las 10:30 GMT, al inicio del periodo de riego (última semana de junio) y en el periodo de máximo estrés hídrico (mediados de septiembre).

2.3.2.3 Fotosíntesis

Las medidas de fotosíntesis realizadas en dos olivos por cada tratamiento de riego (R, S1, S2) mostraron el efecto del estrés hídrico sobre la tasa fotosintética. La tasa de fotosíntesis varía a lo largo del día, como otros procesos metabólicos, según varían las condiciones ambientales que la afectan (temperatura, radiación fotosintéticamente activa, DPV).

La Figura 2.18 muestra los valores de la tasa de fotosíntesis medida a tres horas del día 18 de agosto (6:30, 7:30 y 10:00 horas GMT), para valores de potencial hídrico al mediodía de -0,9, -1,7 y -2,0 MPa para los tratamientos R, S2 y S1, respectivamente. La Figura 2.19 muestra la evolución temporal de la tasa de fotosíntesis, para cada tratamiento, a las 10:00 GMT.



Figura 2.18 Valores medios por tratamiento de la tasa fotosintética en olivo, medida el día 18 de agosto de 2004.



Figura 2.19 Valores medios por tratamiento de la tasa fotosintética, medida a lo largo del período de tratamientos, a las 10:00 GMT.

Las Figuras 2.18 y 2.19 muestran que la mayor tasa fotosintética se obtiene en los árboles del tratamiento R, produciéndose un decrecimiento sobre las 7:30 GMT en los árboles pertenecientes al tratamiento S1 (tratamiento con mayor estrés hídrico), observándose que a las 10:00 GMT se producen las mayores diferencias en la tasa de fotosíntesis entre los distintos tratamientos de riego. La evolución de la fotosíntesis, medida a las 10:00 GMT, durante el período de tratamientos de riego muestra una mayor tasa fotosintética para el árbol sometido al tratamiento

control que para los árboles sometidos al los tratamientos deficitarios S1 y S2, durante todo el período.

2.3.2.4 Temperatura de la copa

En la Figura 2.20 se pueden observar las diferencias entre la temperatura de la copa (Tc) y la temperatura del aire (Ta) obtenidas en la parcela de olivar, usando el sensor de infrarrojo de mano (pistola térmica), durante el verano de 2004 (Figura 2.20a) y durante el verano de 2005 (Figura 2.20b). Las diferencias entre estas medidas (Tc-Ta) obtenidas en melocotonero durante el verano del 2005 se pueden observar en la Figura 2.21. En ambos casos, tanto en olivar como en melocotonero, las diferencias en los valores de Tc-Ta variaron dependiendo de los tratamientos de riego aplicados. Los valores de Tc-Ta obtenidos en árboles bajo tratamiento de riego deficitario fueron mayores que los obtenidos para árboles no regados deficitariamente (tratamientos control). Las diferencias entre Tc y Ta entre los distintos tratamientos de riego fueron menores en el caso de los melocotoneros, debido a que el nivel de estrés hídrico alcanzado por los árboles fue menor que en olivar, ya que los tratamientos de riego deficitario aplicados a los melocotones fueron menos severos que los aplicados a los olivos.



Figura 2.20 Diferencias entre la temperatura de la vegetación (Tc) y la temperatura del aire (Ta) obtenidas a las 12:00 GMT en olivar, con el sensor de infrarrojo de mano, para los diferentes tratamientos de riego: (a) campaña de 2004, y (b) campaña de 2005.

En olivar, los valores de Tc-Ta obtenidos a mitad de septiembre fueron de 7,2 K para los tratamientos S1 y S2, y de 6,4 K para el tratamiento R, en 2004; siendo de 5,8 K para el tratamiento S1, 6,1 K para el tratamiento S2, y 5,2 K para el tratamiento R en 2005 (Figuras 2.20a, 2.20b). Las temperaturas medidas para melocotonero durante la campaña de 2005 mostraron diferencias de Tc-Ta de 4,4 K para el tratamiento A (RDC) y de 4,3 K para el tratamiento B (RDS) a mitad de septiembre (final del período de tratamientos), mientras que Tc-Ta alcanzó 3,3 K para los árboles bajo el tratamiento no deficitario (tratamiento C) y 2,5 K para los árboles bajo el tratamiento D (4/3 C).



Figura 2.21 Diferencias entre la temperatura de la copa (Tc) y la temperatura del aire (Ta) obtenidas a partir de las medidas hechas a las 12:00 GMT con el termómetro de infrarrojo de mano, para cada tratamiento de riego en melocotonero, el año 2005. El periodo de riego acabó el 13 de septiembre (línea gris vertical).

La temperatura de la parte superior de las copas de los olivos fue continuamente medida con los sensores de infrarrojo *Apogee*, simultáneamente con la medida de la temperatura del aire con una *Vaisala*, durante los años 2004 y 2005. Con respecto a la evolución diaria de la temperatura, en los distintos árboles sometidos a los distintos tratamientos de riego, en la Figura 2.22 se muestra dicha evolución para el día 23 de septiembre de 2004 (máximo estrés hídrico). Se observa que los mayores valores de la temperatura de copa se midieron entre las 13:00 y las 15:00 horas GMT (Figura 2.22 a), observándose también durante este período de tiempo las mayores diferencias (4 K) en la temperatura de copa entre árboles de distintos tratamientos de riego (Figura 2.22 b).







Figura 2.22 Temperatura de los diez árboles medidos (a) y detalle de las horas del día en que se observaron las mayores diferencias de temperatura entre árboles (b); temperatura media por tratamiento (c) y detalle de las horas en que se observaron mayores diferencias de temperatura entre tratamientos (d), para el 23 de septiembre (máximo estrés hídrico).

Durante el verano, las mayores diferencias en la Tc entre tratamientos fueron observadas a las 14:00 GMT, aunque los valores de Tc-Ta para los árboles bajo los distintos tratamientos fueron más bajos a las 14:00 GMT que los obtenidos a las 12:00 GMT.

La Figura 2.23 muestra la evolución de Tc-Ta a las 14:00 GMT desde julio a diciembre de 2004 (Figura 2.22a, b) y desde enero a diciembre de 2005 (Figura

2.23c,d). Las mayores diferencias entre los árboles sometidos a los distintos tratamientos de riego se pueden observar desde junio a octubre, a partir de cuando empieza a producirse la recuperación del cultivo debida a las primeras lluvias otoñales, tanto en 2004 como en 2005. En el periodo de máximo estrés hídrico (de agosto a octubre) (Figura 2.23 b,d) se alcanzaron valores de Tc-Ta de 4 K para árboles bajo tratamiento deficitario S1, mientras que los árboles bajo el tratamiento R alcanzaron valores de 2 K tanto en 2004 como en 2005.



Figura 2.23 Evolución anual de Tc–Ta (K) a las 14:00 GMT para los distintos tratamientos en olivar. Tc y Ta se midieron con los sensores de infrarrojo ubicados sobre las copas de los árboles, a) de julio a diciembre de 2004, b) datos para el verano de 2004, c) de enero a diciembre de 2005, y d) datos para el verano de 2005.

2.3.2.4.1 Distribución de temperatura a partir de imágenes obtenidas con cámara térmica.

Durante el verano de 2004, se tomaron medidas de las copas de los olivos sometidos a los distintos tratamientos de riego con la cámara térmica. Los árboles de los que se tomaron las imágenes fueron los árboles centrales de cada una de las parcelas elementales (20 árboles). Se observaron diferencias entre las temperaturas de las copas según el tratamiento de riego aplicado, observándose además mayor homogeneidad en las copas de los árboles regados según sus necesidades hídricas (árboles control). La variabilidad de la temperatura de la cubierta fue propuesta por Clawson & Blad (1982) como un signo de estrés hídrico en maíz, pero no se había hecho ningún estudio aplicando esta metodología en árboles. La Figura 2.24 muestra un ejemplo de la imagen de la temperatura de la copa de un olivo bajo tratamiento deficitario S1 (Figura 2.24a) y de la de una copa bajo tratamiento control R (Figura 2.24b), pudiéndose observar claras diferencias entre la temperatura de las copas, y también en el grado de homogeneidad térmica en cada copa, según el tratamiento de riego aplicado.


Figura 2.24 Imágenes térmicas de: a) la copa de un olivo bajo déficit hídrico y b) la copa de un olivo regado según sus necesidades hídricas, tomadas a las 15 GMT.

Las imágenes térmicas adquiridas con la cámara térmica fueron comparadas con las obtenidas simultáneamente con el radiómetro de infrarrojo de mano (pistola térmica) y con los sensores de infrarrojo colocados sobre las copas de los árboles. Esto se hizo para evaluar la validez de las medidas de temperatura media de copa obtenidas a partir de las imágenes de la cámara térmica. Para ello se compararon la temperatura media obtenida del lateral de la copa a partir de la imagen de la cámara, con la temperatura media de la parte superior de la copa con los sensores de infrarrojo y con la temperatura puntual obtenida con la pistola térmica del lateral de la copa. Todas estas medidas se tomaron simultáneamente. Se puede observar en la Tabla 2.5 como los árboles bajo tratamiento de riego deficitario mostraron



temperaturas más altas que los árboles control, mostrando desviaciones estándar ligeramente mayores.

Tabla 2.5 Potencial hídrico de tallo, temperatura de copa medida con el sensor de infrarrojo térmico de mano y temperatura de copa obtenida a partir de las imágenes de la cámara térmica, con su correspondiente desviación estándar, en los olivos el día 4 de octubre de 2004 a las 15 GMT.

Tratamiento	Potencial hídrico	Temperatura de la copa del olivo (K)				
de riego	(MPa)	Radiómetro de infrarojos	Imagen térmica	Desvest de la imagen		
R	-1.19	307.4	306.0	1.2		
S2	-1.69	307.4	307.0	1.2		
S1	-2.84	308.7	308.0	1.3		

La temperatura media por tratamiento, obtenida con la cámara térmica el 4 de octubre del 2004, para árboles bajo tratamiento de riego S1 fue de 308,0 K (con una desviación estándar de 1,3 K), para un potencial hídrico (Ψ) al mediodía de -2,8 MPa, mientras que la temperatura media de copa obtenida para árboles bajo tratamiento de riego R fue 306,0 K (con una desviación estándar de 1,2 K) para un Ψ de -1.2 MPa (Tabla 2.5). La Figura 2.25 (a,b) muestra las relaciones entre la temperatura de copa obtenida a partir de las imágenes tomadas con la cámara térmica y la temperatura medida con los sensores de infrarrojo térmico de mano $(r^2=0.44, n=20)$ (Figura 2.25a) y con los sensores IRT ubicados sobre las copas de los árboles (r²=0,59, n=10) (Figura 2.25b), el día 4 de octubre del 2004. Las relaciones obtenidas en campo entre el potencial hídrico y la temperatura de la copa de los árboles obtenida a partir de las imágenes de la cámara térmica (Figura 2.25) demostraron la utilidad del uso de la cámara térmica para la detección de estrés hídrico a nivel árbol; así como la desviación estándar de la temperatura de copa obtenida a partir de las imágenes de la cámara, indicando que el grado de heterogeneidad de la temperatura de la copa se relaciona con el grado de estrés hídrico del árbol. Esto es consistente con el coeficiente de determinación obtenido



entre la desviación estándar de la imagen y el potencial hídrico del tallo ($r^2=0,48$, n=11) (Figura 2.25d).

Figura 2.25 Relación entre la temperatura de la copa obtenida a partir de las imágenes de la cámara térmica y la medida con: a) el termómetro de mano (pistola térmica), y b) con los sensores de infrarrojos colocados sobre las copas de los árboles (sensores Apogee), el día 4 de octubre de 2004; c) Relación entre la temperatura obtenida a partir de las imágenes de la cámara térmica y el potencial hídrico del tallo (Ψ); d) Relación entre potencial hídrico del tallo (Ψ) y la desviación estándar de la temperatura de copa obtenida con las imágenes de la cámara térmica.

Capítulo 3

Detección del estrés hídrico y sus efectos en la producción y calidad del fruto, mediante teledetección térmica de alta resolución espacial

3.1 INTRODUCCIÓN

Desde que a finales de los años sesenta se comenzó a utilizar hasta la actualidad, la tecnología del infrarrojo ha ido mejorando desarrollándose sensores cada vez más ligeros, con más ángulo de visión y capaces de proporcionar mayor información espectral (Wanjura et al., 2004), permitiendo la monitorización de la temperatura de la vegetación a distintas escalas temporales y espaciales. Actualmente hay disponibles distintos sensores para monitorizar la vegetación a distintas escalas, tanto aerotransportados como a bordo de satélite, como son el Airborne Thematic Mapper (ATM), Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS), Airborne Hyperspectral Scanner (AHS), Landsat Thematic Mapper (TM), Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), y el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) entre otros. Sin embargo, las características espaciales y espectrales de los actuales sensores a bordo de satélites han hecho que apenas se hayan usado para monitorizar la temperatura de la vegetación de cubiertas no homogéneas, donde el suelo y las sombras juegan un papel muy importante. Algunos estudios recientes de estimación de la temperatura de superficie con teledetección de alta resolución espacial demuestran que esta tecnología es capaz de proporcionar valores precisos de temperatura de superficie. Como ejemplo, Sobrino et al. (2004) hicieron un análisis de calidad de las

imágenes DAIS, comparando la información obtenida con las medidas in situ de temperatura de superficie. Los resultados mostraron desviaciones menores de 1.5 K cuando se aplicaba una calibración vicaria. Está ampliamente aceptado que la corrección atmosférica y la estimación de la emisividad de las superficies son las dificultades más importantes en la estimación de la temperatura de superficie con teledetección. Se han desarrollado varios algoritmos para la estimación de la temperatura de superficie a partir de los datos at-sensor, como son los métodos monocanal (Qin et al., 2001), las técnicas split-window (Price, 1984; Becker and Li, 1990; Sobrino et al., 1991; Prata, 1993; Sobrino et al., 1994) y los métodos multiángulo (Prata, 1993; 1994; Sobrino et al., 1996, Sobrino et al., 2004). Jimenez-Muñoz y Sobrino (2003) propusieron un algoritmo monocanal aplicable a distintos sensores a bordo de satélite, obteniendo desviaciones cuadráticas medias menores de 2 K para AVHRR y para el canal ATSR-2, y menores de 1,5 K para Landsat Thematic Mapper (TM). Recientes estudios comparando la emisividad de la superficie y la temperatura radiométrica obtenidas con los sensores MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) y ASTER, ambos a bordo del satélite de la NASA Earth Observing System (EOS)-TERRA, mostraron entre ambos diferencias de menos de 0,9 K (Jacob et al., 2004). Estos resultados muestran el gran potencial que tiene la teledetección térmica en la obtención de la temperatura de la vegetación, con sensores de media resolución espacial, de un tamaño de píxel entre 90 m (ASTER) y 1 km (MODIS). A pesar de todo esto, los trabajos que utilizan esta metodología para el estudio y la detección de estrés hídrico en cultivos son escasos, sobre todo aplicados a cultivos arbóreos, debido a la necesidad de que las imágenes sean de alta resolución espacial (de un tamaño de píxel de 1 o 2 m), que permitan separar copa, suelo y sombra en la imagen, para poder obtener valores puros de vegetación.

El estrés hídrico no sólo afecta a la productividad de los cultivos sino también a los parámetros de calidad del fruto (Uriu & Magness, 1967; Fereres *et al.*, 2003). Hay trabajos en olivar (por ej., Moriana *et al.*, 2003) y en melocotonero, (por ej., Girona *et al.*, 2003) donde se muestran los efectos del riego deficitario en la producción y en la calidad del fruto. Los trabajos realizados aplicando riego deficitario en frutales persiguen definir estrategias de riego que permitan un ahorro de agua sin que se afecte la producción y calidad del fruto (Fereres y Soriano, 2007). Para diseñar estrategias óptimas de riego deficitario en frutales, es necesario

la detección y la monitorización del estrés hídrico del cultivo, por lo que la detección de pequeñas diferencias térmicas (de 0,5 a 2 K) en el cultivo, a nivel de árbol, que se asocien a distintos niveles de estrés hídrico de los árboles, podría ser una técnica de detección y monitorización del estrés hídrico muy útil para diseñar y aplicar las estrategias de riego deficitario en estos cultivos.

El trabajo presentado en este capítulo tiene por objetivos, por un lado utilizar las imágenes hiperespectrales de alta resolución especial tomadas por el *Airborne Hyperespectral Scanner* AHS para obtener imágenes de temperatura y estudiar la relación entre el estrés hídrico y la temperatura de la vegetación en cubiertas discontinuas, como son el olivar y el melocotonero, tanto a nivel árbol como a nivel parcela de cultivo, en donde se pretende estudiar la variabilidad espacial. Además, en este trabajo se estudia la detección de las diferencias de temperatura de los árboles, asociadas a los diferentes niveles de estrés hídrico generados por la imposición de las distintas estrategias de riego deficitario, tanto en olivo como en melocotonero, y su relación con la productividad y la calidad del fruto. Finalmente, se evalúa la potencialidad de extrapolar estas metodologías de monitorización en cultivos abiertos, a escala ASTER.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Sensor aerotransportado AHS

El instrumento utilizado para la adquisición de las imágenes es el radiómetro hiperespectral aerotransportado AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) (Daedalus Enterprise Inc., WA, USA). Este instrumento registra la radiación procedente de la superficie en 80 bandas espectrales desde 0,43 μ m hasta 12,5 μ m. Un total de 10 bandas del sensor pertenecen a la región del espectro térmico entre 8,40 μ m y 12,45 μ m, con 0,4 μ m de ancho de banda, estos canales fueron usados para obtener la temperatura de la superficie. En la figura 3.1 se pueden observar las funciones filtro de los canales térmicos del sensor.



Figura 3.1 Funciones filtro de los canales pertenecientes al infrarrojo término del AHS.

El AHS es un sensor whiskbroom o de barrido mecánico, la manera en la que adquiere información es en una serie de líneas procedentes de estrechas franjas de terreno, transversales a la dirección de desplazamiento de la plataforma de observación. En cada barrido, la energía recibida es muestreada desde un lado a otro del sensor mediante un espejo rotatorio. A medida que la plataforma se desplaza, sucesivos barridos conforman una imagen bidimensional de la superficie terrestre. Así, una línea de barrido del radiómetro equivale a una línea de píxeles de la imagen. Una vez ubicado el sensor en la plataforma, la estabilidad no se puede suponer y es necesario incorporar un sistema de calibrado en vuelo. En nuestro caso las fuentes de referencia internas fueron dos cuerpos negros controlables en temperatura (de -15 °C a +25 °C) que el espejo mira al final de cada línea de barrido. De esta forma, conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición, los valores digitales de la imagen pueden traducirse en términos de radiancia (Tabla 3.1) y, a partir de ella, calcular magnitudes físicas como la reflectividad o la temperatura del sistema observado.

El campo de visión instantáneo (IFOV) del sensor y la altitud de la plataforma determinan la resolución espacial del píxel, y el "campo de visión

angular total" (FOV) del espejo determina la amplitud de la franja de barrido y la anchura de la imagen.

-FOV & IFOV	90° & 2.5 mrad
-Altura de vuelo respecto al terreno	1000 m
-Resolución en el nadir (GIFOV)	2.5 m (en el nadir)
-Distancia entre pixeles (GSD)	2.1 m (en el nadir)
-Cobertura transversal	2000 m
-Velocidad barrido	35 rps
-Sistema de navegación inercial	encendido

En el pre-proceso de las imágenes se realizaron las transformaciones que se muestran en la Tabla 3.1. Las imágenes con estos tres niveles de proceso se identifican por tanto como L11100 (equivalente al L1b habitual en productos de teledetección).

Proceso	Algoritmo
transformación de ND a radiancia en el sensor (μw / (cm2 sr nm)) según coeficiente de calibración instrumental	Ls = scale * (ND0 - NDbb)/gain scale según ficheros de calibración AHS gain y NDbb según longitud de vuelo
corrección de la distorsión panorámica tangencial por barrido (S-bend)	remuestreo a malla de tamaño constante X=H*IFOV mediante el vecino más próximo o media de los dos píxeles vecinos
transformación de ND a radiancia en el sensor (μw / (cm2 sr nm)) según datos de los cuerpos negros de referencia en vuelo	interpolación lineal entre los puntos [NDbb1, Ls(Tbb1)] y [NDbb2, Ls(Tbb2)]

 Tabla 3.1 Preproceso de las imágenes

Se realizaron tres vuelos (por el INTA; *Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales*) con el avión turbohélice CASA 212-200, los días 25 de julio de 2004 y 16 de julio de 2005; sobre la parcela de olivar a las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT (las 9:30, 11:30 y 14:30 locales) en tanto en el 2004 como en el 2005. Mientras que en la parcela de melocotonero los vuelos se realizaron a las 9:00 GMT en el 2004 y a las 9:00 y 13:00 GMT en el 2005. Las trayectorias de vuelo se

hicieron en el plano solar y se diseñaron de manera que la zona del estudio (parcela experimental) quedara en el centro de la imagen, con las siguientes coordenadas de comienzo y fin de pasada del vuelo para el año 2004 (Tabla 3.2, Figura 3.2):

Tabla 3.2 Coordenadas de comienzo y fin de pasada, año 2004							
Donominación		UTM WGS 84					
Denominación	Х	Y	Zona				
P8E	335 334	4 187 437	30 S				
P8W	331 602	4 188 882	30 S				
P9E	342 772	4 190 554	30 S				
P9W	339 039	4 191 996	30 S				
P10N	341 998	4 192 951	30 S				
P10S	339 812	4 189 599	30 S				
P8E	335 334	4 187 437	30 S				
P8W	331 602	4 188 882	30 S				



Figura 3.2 Zona de estudio, donde están marcadas las trayectorias de vuelo. Las siglas COIAS corresponden a la parcela de olivar y las siglas COIAS_MEL a la parcela de melocotonero.

A la imagen obtenida se le aplicó una corrección atmosférica usando el código de transferencia radiativa MODTRAN-4 (Berk *et al.*, 1999) y radiosondeos lanzados *in situ* a las 7:00 y a las 12:00 GMT, el día 16 de julio de 2005.

Durante cada una de las pasadas del avión sobre el olivar se realizaron medidas de temperatura sobre una balsa de agua con la pistola térmica Raytek – Raynger II (Raytek, CA, USA), con una única banda en el intervalo 8-14 µm. Estas medidas se utilizaron para evaluar los valores de temperatura obtenidos a partir de los datos del sensor aerotransportado. El radiómetro fue previamente calibrado como se explica en el Apartado 2.2.2.4.2. En la campaña de vuelo de 2005 se realizó un estudio del potencial hídrico de árboles sometidos a distintos niveles de estrés hídrico, midiendo el potencial hídrico del tallo en 18 árboles y la conductancia estomática en 12 árboles, simultáneamente a cada una de las pasadas del avión sobre el olivar. En el año 2004 el potencial hídrico de los olivos se midió dos días después del vuelo. En los melocotoneros, tanto en el 2004 como en el 2005, el potencial hídrico de los árboles se midió 4 días antes de la toma de las imágenes aerotransportadas.

3.2.2 Producción y parámetros de calidad del fruto

La zona de olivar en la que se obtuvieron los datos de producción, aunque estaba ubicada en la misma parcela en la que se localizó la zona de validación de la temperatura y de detección del estrés hídrico (Figura 2.2 a,b), no se correspondió con dicha parcela experimental. Los datos de producción y de los parámetros de calidad se obtuvieron en una zona de 15 filas de 24 olivos (360 árboles; 8820 m²) donde se aplicaron distintos tratamientos de riego, que se muestran en la Tabla 3.3.

Tratamiento de riego	Dosis de riego aplicada	Periodo de aplicación del riego				
Ι	100 % ET	mitad de junio-mitad de octubre				
п	50 % ET	primera semana de julio-mitad de septiembre				
11	100% ET mitad de junio-primera semana de ju mitad de septiembre-mitad de octu					
III	25 % ET	primera semana de agosto-mitad de septiembre.				
	100 % ET	mitad de junio-primera semana de agosto, y mitad de septiembre-mitad de octubre				
IV	100 % ET	mitad de junio-mitad de julio, y mitad de septiembre-mitad de octubre				
IV	Sin riego	mitad de julio-mitad de septiembre				

Tabla 3.3 Tratamientos de riego aplicados sobre la zona de olivar de la que obtuvieron los valores de producción y calidad del fruto.

La recolección de la aceituna se realizó usando un vibrador mecánico. Todas las aceitunas cosechadas de cada árbol se pesaron para obtener el rendimiento o producción de aceituna (peso fresco, kg arbol⁻¹), seleccionándose una muestra representativa de 2 kg por árbol para los análisis de los parámetros de calidad. El contenido de aceite en el fruto fresco (peso del aceite por peso del fruto fresco, g g⁻¹) se determinó mediante resonancia magnética nuclear (Hidalgo y Zamora, 2003), y la producción de aceite (kg aceite árbol⁻¹) se calculó como el producto de la producción de aceituna por el contenido de aceite sobre fruto fresco. El contenido de agua en la aceituna se obtuvo secando una muestra en un horno hasta obtener un peso constante, normalizándose el contenido de aceite respecto al peso seco del fruto.

En el caso de la parcela de melocotoneros (Figura 2.4), los árboles se recolectaron de forma manual, realizando tres pasadas para ajustarnos al proceso de maduración de los frutos. En cada una de las pasadas de recolección se pesaron en campo todos los frutos recolectados de los 32 árboles monitorizados (8 por tratamiento), midiéndose el calibre de todos los frutos. Se determinó la producción total (kg árbol⁻¹), el peso unitario (fresco) y el diámetro ecuatorial de los frutos. En laboratorio se determinó el contenido total de sólidos solubles (TSS) en una muestra representativa de diez frutos por árbol, en cada pasada de recolección, usando un refractómetro digital calibrado (modelo ATC-1E, Atago C., Tokio, Japan). Los valores finales de peso unitario del fruto, diámetro medio del fruto y contenido total de sólidos solubles se calcularon como el promedio ponderado de las tres cosechas.

3.2.3 Tratamiento de los datos AHS

Para obtener la temperatura de superficie de las imágenes AHS se usó un algoritmo bicanal como el que se muestra en la Ecuación 1.7, los valores numéricos de los coeficientes a_k se obtuvieron mediante simulación (método descrito en Sobrino *et al.*, 2004). En este estudio, en vez de usar MODTRAN 3.5 y un espectro de 8 emisividades como se hizo en el estudio de Sobrino *et al.* (2004), se usó el código de transferencia radiativa MODTRAN 4 y un espectro de un total de 299 emisividades extraído de la librería espectral ASTER (http://speclib.jpl.nasa.gov). La región atmosférica entre la superficie y el sensor se modificó usando la altitud de vuelo del sensor (1 km). La Tabla 3.4 muestra el error obtenido en el análisis de sensibilidad para las distintas combinaciones de bandas AHS (no se muestran los peores resultados).

Banda i	Banda j	Error (K)
75 (10.07 µm)	76 (10.59 μm)	1.3
75 (10.07 µm)	77 (11.18 μm)	1.2
75 (10.07 µm)	78 (11.78 μm)	1.2
75 (10.07 µm)	79 (12.35 μm)	1.1
76 (10.59 µm)	77 (11.18 μm)	2.2
76 (10.59 µm)	78 (11.78 μm)	1.7
76 (10.59 µm)	79 (12.35 μm)	1.4
77 (11.18 µm)	78 (11.78 μm)	2.4
77 (11.18 µm)	79 (12.35 μm)	1.7
78 (11.78 µm)	79 (12.35 μm)	2.4

Tabla 3.4 Errores obtenidos en la estimación de la temperatura de superficie con el algoritmo bicanal para las diferentes combinaciones de las bandas AHS. Las bandas AHS 71, 72, 73, 74 y 80 no están incluidas.

Los resultados indicaron que la mejor combinación de bandas AHS para la estimación de la temperatura de superficie usando el algoritmo *split-window* es la de la 75 (10,069 μ m) con la 79 (12,347 μ m), obteniéndose un error de 1,1 K con respecto a los datos simulados. La Ecuación 3.1 muestra el algoritmo bicanal con los coeficientes numéricos para la combinación de las bandas 75-79, (ver también ecuación 1.8).

$$T_{s} = T_{75} + 0.4850 (T_{75} - T_{79}) + 0.0068 (T_{75} - T_{79})^{2} + 0.0798 + (47.15 - 10.80W)(1 - \varepsilon) + (-49.05 + 21.53W)\Delta\varepsilon$$
[3.1]

Se comprobó el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto usando los valores de temperatura de superficie de una balsa de agua, medida simultáneamente a los vuelos AHS con un radiómetro de campo Raytek – Raynger II. Las superficies de agua libre son de gran interés para la validación de los datos ya que son prácticamente cuerpos negros. A partir de las temperaturas de brillo obtenidas con el radiómetro de campo se obtuvieron valores de temperatura de superficie, de acuerdo a la Ecuación 1.5 y mediante una inversión de la ley de Plank (Ecuación 1.6) usando una longitud de onda para el centro de la banda de 11 μ m, ya que el radiómetro opera en una sola banda que va de 8 a 14 μ m. En la campaña de 2004 la

radiación descendente se midió en el campo, enfocando el radiómetro de campo al cielo. La emisividad del agua se tomó como 0,985.

Para aplicar el algoritmo *split-window* dado en la Ecuación 3.1, el incremento de la emisividad se estimó como $\Delta \varepsilon = 0$, usándose un valor de vapor de agua atmosférico de W = 0,9 g/cm². El valor del vapor de agua se obtuvo extrapolando a una altitud de 1 km el valor obtenido en el 'El Arenosillo', que forma parte de la red de datos AERONET (<u>http://aeronet.gsfc.nasa.gov</u>). Aunque el lugar está aproximadamente a 250 km de la zona de estudio, el valor es aceptable ya que los términos asociados a W en la Ecuación 3.1 son prácticamente despreciables, debido a la alta emisividad asumida. Los resultados se muestran en la Tabla 3.4, habiéndose obtenido un error cuadrático medio (RMSE) de 1,3 K. Aunque en este análisis solo se han usado tres valores (uno por vuelo), los resultados muestran el buen funcionamiento del algoritmo.

Tabla 3.5 Comparación entre la temperatura de la superficie obtenida a partir de las imágenes AHS, aplicando el algoritmo *split-window* y los valores medidos *in situ* sobre un cuerpo de agua con el radiómetro de campo Ravtek – Ravnger II.

Vuelo	Medida (K)	AHS (K)	AHS-Medida (K)
7:30 GMT	304.8	304.2	-0.6
9:30 GMT	307.8	306.1	-1.7
12:30 GMT	308.1	307	-1.1
		bias	-1.1
		σ	0.6
		RMSE	1.3

Para demostrar que las imágenes térmicas de alta resolución especial pueden ser usadas para monitorizar los cambios de temperatura diarios asociados a distintos niveles de estrés hídrico de los árboles, para las tres imágenes AHS se realizaron tres niveles espaciales de estudio, estimando la temperatura: i) de parcelas homogéneas bajo un mismo tratamiento hídrico, que comprendían 12 árboles (3 filas de cultivo de 4 árboles) (Figura 3.2 a,d); ii) de pequeñas parcelas de un mismo tratamiento, constituidas por 4 árboles contiguos en una misma fila (Figura 3.2 b,e); y iii) de árboles individuales (Figura 7 c,f). Se usó el software de procesamiento de imágenes ENVI (Research Systems Inc., CA, USA) para extraer los datos de cada imagen y calcular los índices de vegetación que se usaron para separar los distintos componentes de la escena. A la imagen se le aplicaron

diferentes umbrales NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para separar copas puras de suelo soleado y de sombras, permitiendo la estimación de la temperatura de superficie de la vegetación pura, y minimizando los efectos de mezcla térmica de las componentes debidas al suelo soleado y sombreado (Figura 3.2 d,e,f). Esto último es de importancia crítica, debido a las grandes diferencias térmicas entre la vegetación (copas de los árboles) y el suelo desnudo, que alcanzaron diferencias de (Tsuelo-Tc) mayores de 8 K a las 7:30 GMT, 13 K a las 9:30 GMT y 20 K a las 12:30 GMT, en el olivar.



c) f) **Figura 3.3** Imágenes obtenidas con el sensor aerotransportado AHS mostrando las parcelas usadas para cada nivel de estudio: a) 12 árboles en 3 filas de cultivo pertenecientes al mismo tratamiento de riego; b) parcelas pequeñas de 4 árboles contiguos bajo el mismo tratamiento de riego; y c) árboles individuales. La aplicación de umbrales de NDVI permitió la identificación de los píxeles de vegetación puros (d, e, f).



Se aplicó el algoritmo split-window dado en la Ecuación 3.1 a las tres imágenes AHS (7:30, 9:30 y 12:30 GMT) y se extrajeron los valores de temperatura de cada árbol individual, con el objeto de compararlas con las medidas in situ tomadas por los termómetros de infrarrojo Apogee instalados sobre las copas de los árboles. Además de considerar la diferencia de emisividad $\Delta \varepsilon = 0$, se usó un valor medio de emisividad para las copas de los árboles de 0,98. La Tabla 3.5 muestra los resultados de la comparación, en los que se obtuvo un RMSE de 1,6 K entre la temperatura de las copas de los árboles estimada a partir de las imágenes AHS y medida con los sensores de infrarrojo IRT. El error cometido en la estimación de la temperatura de la superficie a partir de las imágenes AHS se corresponde con la precisión esperada al usar datos de teledetección térmica (ver las referencias dadas en el apartado 3.1). Hay que señalar que el bias total obtenido es 1,3 K, pudiendo ser corregido de los valores, obteniéndose en este caso un error de 0,9 K (Tabla 3.5), siendo éste un valor inferior a las diferencias térmicas encontradas en campo, debidas al distinto nivel de estrés hídrico soportado por los olivos.



Tabla 3.6 Comparación entre la temperatura de superficie obtenida a partir de las imágenes AHS, mediante un algoritmo *split-window* dado, y los valores medidos *in situ* con los sensores Apogee en cada árbol individual. El nombre utilizado para cada árbol corresponde a su posición en la parcela, con el tratamiento de riego entre paréntesis.

Vuelo (CMT)	Árbol	Medidos	AHS (V)	Medidos – AHS	
(GMT)	0.26(82)	(K)	205.4	<u>(K)</u>	
	9-30(32)	302.9	303.4	-2.5	
	9-37(32)	303.2	204.6	-1.0	
	9-40(31)	302.7	204.0	-1.9	
	9-41(51)	302.0 202.6	204.8 204.2	-2.2	bias = -1.9 K
7:30	12-37(K)	302.0	504.2 204.7	-1.3	σ = 0.3 K
	12-33(SI)	303.2	304.7 204.6	-1.5	RMSE = 1.9 K
	12-30(R)	302.5	304.0 204.1	-2.1	
	12-44(R)	302.2	304.1	-1.9	
	12-40(S2)	302.5	304.2	-1.8	
	12-41(S2)	302.1	303.9	-1.8	
	9-36(S2)	310.3	311.6	-1.3	
	9-37(S2)	310.8	311.7	-0.9	
	9-40(S1)	309.5	311.1	-1.6	bias = -1.3 K σ = 1.1 K RMSE = 1.7 K
	9-41(S1)	309.4	310.7	-1.3	
9:30	12-37(R)	309.8	310.1	-0.2	
	12-33(S1)	310.3	310.8	-0.5	
	12-36(R)	309.0	310.2	-1.2	
	12-44(R)	308.1	310.4	-2.3	
	12-40(S2)	309.0	310.7	-1.6	
	12-41(S2)	308.4	310.5	-2.1	
	12-37(R)	315.5	314.7	0.9	
	12-36(R)	314.6	314.4	0.2	
	12-44(R)	313.7	314.1	-0.4	
	9-36(S2)	317.1	317.0	0.1	
12.20	9-37(S2)	316.8	318.1	-1.3	Dlas = -0.8 K
12:50	12-40(S2)	314.4	314.9	-0.6	$\mathbf{O} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{Z} \mathbf{K}$ $\mathbf{DMSF} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{Z} \mathbf{K}$
	12-41(S2)	314.4	316.0	-1.6	$\mathbf{K}\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{E} = 1.4\mathbf{K}$
	9-40(S1)	316.2	317.9	-1.7	
	9-41(S1)	315.6	318.5	-2.9	
	12-33(S1)	316.0	317.2	-1.2	
				Total bias	= -1.3 K
				Total σ =	= 0.9 K
				Total RMS	E = 1.6 K

A las imágenes del año 2005 también se les aplicó el algoritmo split-window, esta vez con los valores de vapor de agua atmosférico obtenidos en los radiosondeos que se lanzaron a las 7:00 y a las 12:00 GMT. Adicionalmente, en el 2005 se aplicó también el método TES adaptado a los datos AHS (Sobrino *et al.*, 2006), ya que este método necesita una corrección atmosférica precisa y fue solamente este año (2005) cuando se lanzaron radiosondeos cercanos al momento de paso del avión por la zona del estudio.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Relación entre temperatura y estrés hídrico.

En la Figura 3.4 se muestran los resultados obtenidos, donde se comparan las diferencias de temperatura entre árboles con distinto tratamiento de riego, relativas a los árboles control (Tc-T_R), estimadas con el sensor AHS. Los resultados se analizan a nivel de parcela de tratamiento (12 árboles) y a nivel de fila de 4 árboles contiguos del mismo tratamiento. Se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de riego para cada hora de pasada del avión: 7:30 GMT (Figura 3.4 a,d), 9:30 GMT (Figura 3.4 b,e) y 12:30 GMT (Figura 3.4 c,f), mostrando mayores diferencias de temperatura los tratamientos deficitarios S1 y S2 comparados con el tratamiento control (R). Estos resultados se repiten para todos los niveles de estudio: parcelas de tratamiento de 12 árboles (Figura 3.4 a,b,c), filas de 4 árboles del mismo tratamiento (Figura 3.4 d,e,f) y árboles individuales, como también veremos posteriormente.



Figura 3.4 Diferencias de temperatura obtenidas entre la temperatura de copa de los árboles en distintos tratamientos de riego (Tc) y la temperatura media de los árboles control (Tratamiento R) (T_R), obtenidas a partir de las imágenes AHS a las tres horas de paso del avión: 7:30 (a,d), 9:30 (b,e) y 12:30 GMT (c,f). Los dos niveles de estudio analizados fueron las parcelas de 12 árboles bajo el mismo tratamiento de riego (a,b,c), y las filas de 4 árboles contiguos del mismo tratamiento de riego (d,e,f).

En la Tabla 3.7 se presentan los valores medios de temperatura obtenidos para los distintos tratamientos de riego en olivar a partir de las imágenes obtenidas con el sensor aerotransportado AHS, para las campañas de verano de 2004 y de 2005. En la Tabla 3.8 se presentan dichos valores para los distintos tratamientos de riego en los melocotoneros. Se puede observar que los valores obtenidos de Tc y de Tc-Ta a partir de teledetección aerotransportada para cada parcela experimental y para cada tratamiento de riego son consistentes con los valores medidos en campo. (Figura 2.23) Los olivos bajo tratamiento el tratamiento no deficitario (control) mostraron temperaturas de copa más bajas que los olivos bajo tratamientos de riego deficitarios, para las tres horas de vuelo (Tabla 3.7). Las diferencias observadas entre los tratamientos deficitarios y el control llegaron a 1 K y a 2 K, a las 12:30 GMT, en el 2004 y en el 2005, respectivamente. Los valores de Tc-Ta llegaron a 3 K y a 4 K en los árboles bajo tratamiento deficitario S1, a las 12:30 GMT, en el

2004 y en el 2005, respectivamente, mientras que los árboles bajo el tratamiento control mantuvieron esa diferencia en 2 K. De la misma manera, en los melocotoneros se obtuvieron diferencias entre tratamientos de riego extremos (B y D) que llegaron a 1 K a las 13:00 GMT en el 2005, siendo Tc-Ta de 4 K para el tratamiento B y de 3 K para el tratamiento D (Tabla 3.8). Estos resultados demuestran que las imágenes térmicas de alta resolución espacial son capaces de detectar diferencias en la temperatura de las copas asociadas al tratamiento hídrico, detectando el nivel de estrés relativo de los árboles.

Tabla 3.7 Temperatura de copa (Tc) y diferencias entre temperatura de la vegetación y temperatura de aire (Tc-Ta) para los distintos tratamientos de riego en olivar, obtenidas a partir de las imágenes AHS, a las 3 horas de vuelo, el 25 de julio 2004 y el 16 de julio 2005. S1 y S2: tratamientos de riego deficitario, R: tratamiento de riego control.

Año	Hora	Tc (K)			Tc-Ta (K)		
	(GMT)	S1	S2	R	S1	S2	R
	7:30	303.5±0.1	303.5±0.4	303.0±0.2	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.4	0.6 ± 0.2
2004	9:30	309.8±0.3	309.7 ± 0.5	309.0±0.2	1.7 ± 0.3	1.6 ± 0.5	0.9 ± 0.2
	12:30	315.4±0.6	315.0±0.3	314.4±0.4	3.3 ± 0.6	2.9 ± 0.3	2.3 ± 0.4
	7:30	299.9±0.2	299.7±0.5	299.1±0.2	1.8±0.2	1.7±0.5	1.1±0.2
2005	9:30	306.1±0.5	306.0±1.0	304.6±0.6	3.5±0.5	3.3±1.0	2.1±0.6
	12:30	317.1±0.5	317.0±1.0	315.2±0.7	4.1±0.5	$4.0{\pm}1.0$	2.3±0.7

Tabla 3.8 Diferencias de temperatura (Tc-Ta) entre las temperaturas de las copas (Tc) y la temperatura del aire (Ta) en melocotonero, para los distintos tratamientos de riego (A, B, C y D), obtenidas por medio del sensor AHS a las distintas horas de paso del avión el 25 de julio de 2004 y el 16 de julio de 2005.

	A ~ ~	Hora	Tratamiento de riego					
	Апо	(GMT)	Α	В	С	D		
	2004	9:00	307.4±0.2	307.6±0.4	307.4±0.3	307.1±0.7		
Tc (K)	2005	9:00	301.6±0.2	302.2±0.3	301.7±0.3	301.4±0.4		
		13:00	312.0±1.0	313.0 ± 1.0	312.4±0.9	312.0±1.0		
	2004	9:00	0.7±0.2	1.1±0.4	1.3±0.3	1.0±0.7		
Tc-Ta (K)	2005	9:00	2.1±0.2	2.6±0.3	2.1±0.3	1.9±0.4		
	2005	13:00	3.0 ± 1.0	4.0 ± 1.0	3.6±0.9	3.0±1.0		

El resultado de relacionar el potencial hídrico (Ψ) (la medida más usada para caracterizar el estado hídrico de las plantas) con la diferencia Tc-Ta, obtenida a partir de las imágenes AHS para la campaña de 2004, en olivar se puede observar en la Figura 3.5 a,b,c. Aunque las medidas del potencial hídrico se realizaron dos días después del vuelo, a las 10:00 GTM en cada árbol, los coeficientes de correlación para cada uno de los vuelos fueron: r²=0,62 (comparando el Ψ con la imagen térmica de las 7:30), r²=0,35 (para la imagen de las 9:30) y r²=0,25 (para la imagen de las 12:30 GMT).



Figura 3.5 Relación entre el Ψ s y la Tc-Ta, obtenida a partir de las imágenes AHS, a las 7:30 (a), 9:30 (b) y a las 12:30 GMT (c), y con los datos recolectados con los sensores de infrarrojo colocados sobre las copas de los árboles, a las 10:00 GMT (d).

Estos resultados sugieren que la teledetección térmica de alta resolución especial es capaz de detectar niveles de estrés hídrico en árboles individuales, a

partir de la temperatura de la copa. Estos resultados son consistentes con la relación obtenida entre el Ψ y los datos de temperatura de copa menos temperatura de aire (Tc-Ta) medidos en campo con los sensores de infrarrojo térmico (IRT), en la que se obtuvo un coeficiente de correlación de r²=0,51 (Figura 3.5d).

Estos primeros resultados obtenidos en la campaña de 2004 motivaron a realizar un estudio más completo en la campaña de 2005, en la que tanto la conductancia estomática como el potencial hídrico se midieron simultáneamente a cada pasada del avión. La Figura 3.6 muestra las relaciones entre Tc-Ta, con Tc obtenida para cada copa a partir de las imágenes térmicas de AHS, y la conductancia estomática (Gl), de cada árbol medido en campo, a las 7:30 GMT (a, b), a las 9:30 GMT (c, d), y a las 12:30 GMT (e, f). El análisis se realizó para árboles individuales (Figura 3.6a, c, e) y para parcelas homogéneas (12 árboles bajo un mismo tratamiento de riego) (Figura 3.6b, d, f). Se obtuvieron los siguientes coeficientes de determinación: $r^2=0,59$ (7:30 GMT), $r^2=0,57$ (9:30 GMT), y $r^2=0,60$ (12:30 GMT), para árboles individuales; y $r^2=0,87$ (7:30 GMT), $r^2=0,83$ (9:30 GMT), y $r^2=0,77$ (12:30 GMT) para las parcelas homogéneas de tratamientos de riego.

Por otra parte, la Figura 3.7 muestra la relación entre el potencial hídrico y Tc-Ta, para cada hora de vuelo, con coeficientes de determinación: $r^2=0,35$ (7:30 GMT), $r^2=0,4$ (9:30 GMT), y $r^2=0,49$ (12:30 GMT), para árboles individuales; y $r^2=0,39$ (7:30 GMT), $r^2=0,51$ (9:30 GMT) y $r^2=0,52$ (12:30 GMT), para las parcelas homogéneas de tratamientos de riego.



Figura 3.6 Relaciones entre Tc-Ta (K) obtenida a partir de las imágenes AHS y conductancia estomática (Gl) medida en los olivos. Relaciones para árboles individuales: a) a las 7:30 GMT, c) a las 9:30 GMT, y e) a las 12:30 GMT; y para parcelas homogéneas de 12 árboles bajo el mismo tratamiento de riego: b) a las 7:30 GMT, d) a las 9:30 GMT, y f) a las 12:30 GMT.





Figura 3.7 Relaciones entre Tc-Ta obtenidas a partir de las imágenes AHS y el potencial hídrico (Ψ) medido en olivar. Para árboles individuales: a) a las 7:30 GMT, c) a las 9:30 GMT, y e) a las 12:30 GMT, y para parcelas homogéneas: b) a las 7:30 GMT, d) a las 9:30 GMT, y f) a las 12:30 GMT.

De la misma manera, la Figura 3.8 muestra los resultados obtenidos en melocotonero, mostrándose las relaciones entre el potencial hídrico y Tc-Ta estimada a partir de las imagines AHS, para árboles individuales (Figure 9a, c, e) y para cada tratamiento de riego (Figure 9b, d, f), para la campaña de 2004 (a, b) y para la campaña de 2005 (c, d, e, f). En este caso el potencial hídrico de los árboles se midió 4 días antes del vuelo. Los resultados muestran la detección satisfactoria mediante teledetección térmica aerotransportada del nivel de estrés hídrico inducido en los árboles con los distintos tratamientos de riego, obteniéndose coeficientes de determinación entre el Ψ y Tc-Ta de r²=0,81 (9:00 GMT), en 2004, y de r²=0,75 (9:00 GMT), en 2005, para los valores medios obtenidos para cada tratamiento de riego. Estos resultados son similares a los obtenidos en olivar, mostrando la capacidad de detección del estrés hídrico a partir de la estimación de la temperatura de la cubierta.

Capítulo 3 Detección de estrés con teledetección de alta resolución espacial



(e)

(f)

Figura 3.8 Relaciones entre los valores de Tc-Ta obtenidos a partir de las imágenes AHS y el potencial hídrico (Ψ), para árboles individuales: a) a las 9:00 GMT en la campaña 2004, c) a las 9:00 GMT em la campaña 2005, y e) a la 13:00 GMT en la campaña 2005; y para los tratamientos de riego: b) a las 9:00 GMT en la campaña 2004, d) a las 9:00 GMT en la campaña 2005, y a las 13:00 GMT en la campaña 2005, en melocotonero.

3.3.2 Distribución espacial del estrés hídrico

La consistencia entre los valores de temperatura obtenidos de las imágenes y los valores de temperatura de copa medidos en campo, permitió la obtención de la distribución espacial de la temperatura de la copa respecto a la temperatura de los árboles control (Tc-T_R) y de la temperatura de copa menos la temperatura de aire (Tc-Ta), para cada vuelo, en las parcelas de olivar y melocotonero.

3.3.2.1 Mapas de Tc-T_R

En la Figura 3.9 se puede observar la distribución espacial de la diferencia entre la temperatura de las copas de cada árbol y la temperatura media de las copas de referencia (los árboles regados no deficitariamente) para cada vuelo, en la parcela de olivar. Se puede observar como el número de árboles que superan los 2 K de diferencia de temperatura (T_C - T_R) aumenta conforme avanza la mañana. También se puede observar la distribución espacial de la evolución de T_C - T_R .

Capítulo 3 Detección de estrés con teledetección de alta resolución espacial



Figura 3.9 a) Imagen de la parcela de olivar; b,c,d) Imágenes de $Tc-T_R$ obtenidas a partir de las imágenes del sensor AHS para cada hora de vuelo: b) 7:30, c) 9:30 y d) 12:30 GMT.

3.3.2.2 Mapas de Tc-Ta

Las imágenes de la Figura 3.10 muestran la diferencia de temperaturas entre la vegetación y el aire (Tc-Ta), en la parcela de olivar, para las 3 horas del día en las que fue sobrevolada por el avión. Esta diferencia es un indicador muy utilizado del grado de estrés hídrico de la vegetación, por lo que estas imágenes nos permiten evaluar los efectos de la evolución del nivel de estrés hídrico en los olivos, tanto temporal como espacialmente, al nivel toda la parcela. Se observa,



también, como los valores de Tc-Ta aumentan conforme avanza la mañana, obteniéndose diferencias mayores de 4 K al mediodía (12:30 GMT) y menores de 1 K en la mañana (7:30 GMT).



Figura 3.9 a) Imagen de la parcela de olivar; b,c,d) Imágenes de Tc- T_a obtenidas a partir de las imágenes del sensor AHS, para cada hora de vuelo: b) 7:30, c) 9:30 y d) 12:30 GMT.

También se obtuvieron mapas de Tc-Ta en melocotonero, para las dos horas que la parcela fue sobrevolada por el avión en 2005 (Figura 3.10). Se puede observar la distribución espacial de los niveles de estrés hídrico en los árboles, según la temperatura de la vegetación en la parcela, así como su variación temporal

a lo largo del día. Se puede observar como a las 9:00 GMT la diferencia Tc-Ta no sobrepasa los 2 K para la mayor parte de la vegetación, mientras que excede los 5 K a la 13:00 GMT.



Figura 3.10 a) Imagen de la parcela de melocotonero, b,c) Mapas de Tc-Ta para las dos horas de vuelo en 2005: b) a las 9:00 GMT, y c) a las 13:00 GMT.

3.3.3 Relación entre datos térmicos obtenidos con AHS, producción y calidad del fruto

La detección satisfactoria del nivel de estrés hídrico en los árboles, dependiendo de los tratamientos de riego aplicados, tanto en olivar como en melocotonero, permite el cálculo de la variabilidad espacial en el campo y el mapeo de potenciales indicadores de la producción y de algunos parámetros de calidad del fruto.

3.3.3.1 Resultados para olivar

La Tabla 3.9 muestra los coeficientes de determinación obtenidos entre los valores de Tc-Ta a partir de las imágenes obtenidas mediante teledetección y la producción y algunos parámetros de calidad del fruto en olivo, tanto para la campaña de 2004 como para la campaña de 2005. Estas relaciones se obtuvieron para cada parcela homogénea de 12 árboles de un mismo tratamiento de riego (para un total de 16 parcelas, cuatro por tratamiento) y para cada tratamiento de de riego, en ambos casos para las tres horas de paso del avión. Los coeficientes de determinación obtenidos para algunos de los parámetros de calidad, sugieren relaciones con los niveles de estrés hídrico detectados con las imágenes térmicas: $r^2=0,95$ y $r^2=0,89$, para contenido de agua en el fruto, y $r^2=0,91$ y $r^2=0,92$ para peso fresco del fruto, para los años 2004 y 2005, respectivamente. Se observan peores relaciones entre la Tc-Ta y la producción y los parámetros de calidad estudiados para el año 2005, que se puede atribuir a la vecería del olivo, ya que el 2005 fue un año de descarga, en el que tan solo se alcanzó el 30% de la producción obtenida en el 2004.

Tabla 3.9 Coeficientes de determinación (r^2) obtenidos de las relaciones entre la temperatura de la vegetación menos la temperatura del aire (Tc-Ta) y la producción y algunos parámetros de calidad en olivar, para parcelas homogéneas de 12 árboles con el mismo tratamiento de riego y para cada tratamiento de riego, obtenidos para los años 2004 y 2005 (sólo se incluyen los valores para *P*<0.05). Las imágenes fueron tomadas el 25 de julio 2004 y el 16 de julio 2005, a tres horas del día (9:30, 11:30 y 14:30 GMT).

	r²	Producción de aceituna (kg árbol ⁻¹)	Contenido de agua (%)	Contenido de aceite (%, peso seco)	Producción de aceite (kg árbol ⁻¹)	Peso del fruto (g)
	Bloques 9:30 (n = 16)	0.31	0.33			
	Tratamientos 9:30 (n = 4)	0.84	0.83	0.80		
Tc-Ta	Bloques 11:30(n = 16)	0.39	0.69			0.53
(2004)	Tratamientos $11:30 (n = 4)$	0.77	0.95			0.91
	Bloques 14:30 (n = 16)		0.51			0.46
	Tratamientos 14:30 (n = 4)			0.80		
	Bloques 9:30 (n = 16)					
	Tratamientos 9:30 (n = 4)					0.77
Tc-Ta (2005)	Bloques 11:30 (n = 16)					
	Tratamientos 11:30 (n = 4)			-		0.92
	Bloques 14:30 (n = 16)					
	Tratamientos 14:30 (n = 4)		0.89		0.87	

-- Coeficientes de determinación para P>0.05

3.3.3.2 Resultados para melocotonero

En melocotonero también se relacionó la diferencia Tc-Ta obtenida a partir de las imágenes AHS (obtenidas el 25 de julio de 2004 y el 16 de julio de 2005) con la producción de fruta y con algunos parámetros de calidad del fruto. Los
resultados se muestran para los datos obtenidos en el 2004 en el 2005 (Tabla 3.10). Los coeficientes de determinación obtenidos para los distintos tratamientos de riego, en ambos años, sugieren una relación entre la detección del nivel de estrés hídrico en los árboles mediante teledetección térmica y los parámetros de calidad del fruto analizados: $r^2=0,94$ y $r^2=0,77$ para diámetro medio del fruto, $r^2=0,82$ y $r^2=0,81$ para el peso medio del fruto, y $r^2=0,90$ y $r^2=0,83$ para el contenido total de sólidos solubles, para los años 2004 y 2005, respectivamente.

Tabla 3.10 Coeficientes de determinación (r^2) para las relaciones entre temperatura de la vegetación menos temperatura del aire (Tc-Ta) y la producción y algunos parámetros de calidad en melocotón, obtenidos para cada parcela elemental y para cada tratamiento de riego, en los años 2004 y 2005. Las imágenes se tomaron el día 25de julio de 2004 y el día 16 de julio de 2005 a las 9:00 GMT.

	r²	Número de frutos por árbol	Producción (kg árbol ⁻¹)	Diámetro máx (mm)	Peso del fruto (g)	Contenido de solidos solubles (%)
Tc-Ta	Bloques (n=16)	0.34	0.32	0.24		
(2004)	Tratamientos (n=4)			0.94	0.82	0.90
Tc-Ta	Bloques (n=16)		0.33	0.41	0.44	0.43
(R) (2005)	Tratamientos (n=4)			0.77	0.81	0.83

-- Coeficientes de determinación para P>0,05.

Estos resultados sólo constituyen una primera aproximación al uso de la detección térmica para la estimación de parámetros de calidad del fruto, a partir de relaciones sencillas, pero sugieren que la teledetección térmica de alta resolución espacial podría usarse para predecir algunos parámetros de calidad del fruto asociados al nivel de estrés hídrico de los árboles, que es posible detectar mediante imágenes térmicas. Una sola imagen tomada un día característico de verano, antes de la cosecha, podría suministrar información para poder caracterizar el estrés hídrico de la parcela y ser usada como un indicador de predicción de la futura producción y calidad del fruto, en árboles sometidos a distintos tratamientos de riego o con distinto nivel de estrés hídrico.

3.4 ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL USO DE ASTER PARA DETECCIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO A PARTIR DE DATOS AHS

Con objeto de estudiar las posibilidades de usar satélites de resolución espacial media, como lo es ASTER (90 m de resolución espacial), para la detección de estrés hídrico en cultivos abiertos, se hizo una degradación de la resolución espacial para estudiar los efectos en la temperatura de la agregación de copa, suelo y sombras, reproduciéndose también las características espectrales de ASTER a bordo del satélite TERRA a partir de los datos AHS. En la Figura 3.11 se puede observar la misma imagen de la zona de estudio: a) con resolución espacial de 2 m (imagen original AHS) y con resolución espacial de 90 m (resolución de las bandas térmicas del sensor ASTER). Se puede observar el grado de agregación que se produce en los píxeles ASTER, donde no se pueden distinguir árboles individuales ni filas de cultivo.

El sensor ASTER tiene 5 bandas en el térmico, dentro de la región espectral de entre 8-12 μ m, que corresponden a las bandas 10 a 14, con rangos espectrales de 8.125-8.475, 8.475-8.825, 8.925-9.275, 10.25-10.95 y 10.95-11.65 μ m (Yamaguchi *et al.*, 1998; Abrams, 2000). Este estudio se realizó usando la ecuación de tranferencia radiativa aplicada a la región espectral del infrarrojo térmico, para cierta banda del sensor (Ecuación 1.3)

La Ecuación 1.3 ha sido usada para simular la radiancia que le llega al sensor (L_{sensor}) para cada banda térmica de ASTER. Para esto se usó la temperatura de superficie (T_s) y la emisividad (ε) obtenidas de los datos AHS de 2 m de resolución espacial. Las emisividades simuladas para ASTER se obtuvieron usando relaciones lineales entre las emisividades de cada banda ASTER y AHS, siendo las emisividades ASTER obtenidas de la base de datos de espectros de emisividad de la librería espectral de ASTER (http://speclib.jpl.nasa.gov). Los parámetros atmosféricos (τ , L^{\uparrow} , L^{\downarrow}) se obtuvieron de los radiosondeos y del modelo de transferencia radiativa MODTRAN-4, usando las funciones filtro de las bandas ASTER. En nuestro caso, la radiancia at-sensor de resolución espacial de 2 m para las características espectrales de ASTER fue agregada en píxeles de 15 x 20 m², siendo este el tamaño de las parcelas elementales que comprenden 12 árboles bajo el mismo tratamiento de riego. Hay que tener en cuenta que este estudio busca

evaluar la aplicabilidad de sensores térmicos de resolución media en la detección de estrés hídrico en cultivos, según el tratamiento de riego aplicado, usando las bandas espectrales del sensor ASTER e información agregada, lo cual sería de gran interés para monitorizar globalmente cultivos abiertos.



Figura 3.11 Imagen de la zona de estudio: a) con resolución espacial de 2m (AHS) y b) con resolución espacial 90 m (resolución ASTER).

Los resultados de simular las características espectrales del sensor ASTER, agregando copas, suelo y sombras, a nivel de tratamiento de riego (15 x 20 m² de resolución espacial dado al diseño experimental) se muestran en la Figura 3.12. En esta figura (a, c, y e) se muestra la relación entre la temperatura de superficie de las parcelas homogéneas de tratamiento, de 15 x 20 m², obtenida con el sensor AHS y

las simuladas para las características espectrales del sensor ASTER. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron mayores de r²=0,90 a las tres horas de paso del avión, con errores cuadráticos medios (RMSEs) más bajos de 1 K (RMSE =0.04 a las 9:30, RMSE=0.98 a las 11:30 y RMSE=0.06 a las 12:30 GMT). La Figura 3.12 (b, d, f) muestra la relación obtenida entre el píxel ASTER simulado (Tc) menos la temperatura del aire (Ta) y el potencial hídrico (Ψ), para todos los árboles pertenecientes a cada parcela homogénea de tratamiento de riego. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron: $r^2=0.54$ (7:30 GMT) y $r^2=0.58$ (12:30 GMT). Si comparamos estos resultados con los obtenidos para AHS entre Tc-Ta y Ψ para parcelas homogéneas de un mismo tratamiento de riego (Figuras 3.7 b,d, f), se comprueba que se mantienen los coeficientes, una vez que se han simulando las características ASTER agregando vegetación pura de las copas, suelo y sombras. Estos resultados sugieren una posible aplicación potencial de esta metodología para la detección de niveles de estrés hídrico en cultivos abiertos utilizando sensores de resolución media. Aunque las diferencias medias entre la temperatura de la vegetación y la del suelo fueron de11 K a las 9:30 y de 23 K a las 12:30, el efecto de la temperatura del suelo en cada parcela fue similar, debido a la uniformidad del suelo de la parcela de olivar y de su manejo, independientemente del tratamiento de riego aplicado.





Figura 3.12 Relación entre temperaturas de superficie de las parcelas de tratamiento de de riego, de 15 x 20 m², obtenidas con el sensor AHS y simuladas para las características espectrales del sensor ASTER: a) a las 7:30 GMT, c) a las 9:30 GMT y e) a las 12:30 GMT. Relaciones entre Tc-Ta simulada para las características de ASTER y el potencial hídrico del tallo: b) a las 7:30 GMT, d) a las 9:30 GMT, y f) a las 12:30 GMT. En la parcela de olivar.



Capítulo 4

Detección del estado hídrico del cultivo con teledetección de resolución espacial media

4.1 INTRODUCCIÓN

La detección del estado hídrico de los cultivos, en respuesta al tratamiento de riego aplicado, es un factor clave para el diseño de propuestas de manejo del agua de riego y de suministro de las necesidades hídricas, incluyendo las políticas de gestión del agua en regiones semiáridas (Annan, 2000).

Los métodos tradicionales de estimación de las necesidades hídricas del cultivo mediante teledetección usan índices de vegetación como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*; Rouse *et al.*, 1974) o el SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*; Huete, 1988), ambos relacionados con la cobertura vegetal y la estructura de la vegetación, para estimar los coeficientes de cultivo (Kc) (Bausch y Neale, 1987; Ray y Dadhwal, 2001; Tasumi y Allen 2007). Los coeficientes de cultivo incorporan la información relativa al cultivo (área foliar, rugosidad,...) a la evapotranspiración de referencia (ETo) para calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc = Kc × ETo). Estas metodologías, basadas en la relación entre NDVI (o SAVI) y el Kc se han aplicado satisfactoriamente en cultivos herbáceos, donde la vegetación cubre gradualmente el suelo conforme avanza el desarrollo del cultivo. Sin embargo, apenas hay trabajos en esta línea aplicados a árboles, siendo un ejemplo de uno de ellos la comparación hecha entre

la ET estimada a partir de datos de satélite y la medida con la técnica de *eddy covariance* en nogal americano bajo riego (Wang *et al.*, 2007).

Por otro lado, los estudios basados en la detección de estrés hídrico y en la identificación de parcelas en secano y regadío, dentro del ámbito de la clasificación, están basados completamente en diferencias de NDVI (Mo et al., 2004; Ines & Honda, 2005), obteniendo información a nivel de subpixel con imágenes de baja y de media resolución espacial. No obstante, estos métodos discriminan satisfactoriamente cultivos herbáceos en regadío de los de secano, pero no son válidos para árboles, en especial árboles perennes, tanto en vegetación natural como agrícola, donde los cambios en la estructura de la cubierta en respuesta al estado hídrico son lentos y no detectables visualmente. En el capítulo anterior, se demostró la capacidad de detectar niveles de estrés hídrico en frutales con teledetección térmica de alta resolución (2 m), evaluando la aplicación potencial de estos métodos de detección de estrés hídrico a imágenes térmicas del sensor ASTER. Como se ha comentado anteriormente, el estrés hídrico se desarrolla en los cultivos cuando la pérdida de agua por evaporación excede al suministro hídrico desde el suelo. Cuando una planta sufre estrés hídrico y la tasa de transpiración decrece a causa del cierre estomático, la temperatura de la planta aumenta debido a una disminución del enfriamiento por una menor evaporación de agua a través de los estomas. En el capítulo anterior se demostró también la posibilidad de representar a partir de imágenes de sensor aerotransportado mapas de la temperatura de las copas menos la temperatura del aire (Tc-Ta), como indicador del potencial hídrico y de la conductancia estomática en cultivos abiertos, bajo tratamientos de riego deficitarios, siendo posible identificar árboles individuales bajo distintos tratamientos de riego con imágenes térmicas de alta resolución espacial AHS (Airborne Hyperspectral Scanner).

El principal objetivo del estudio que se describe a continuación es evaluar si los resultados obtenidos en los capítulos anteriores a nivel puntual (sensores de infrarrojo térmico) y con alta resolución (2-m, con el sensor aerotransportado AHS) son extrapolables a resolución espacial media (sensor ASTER a bordo del satélite TERRA). De esta manera, se avanza en la evaluación de métodos para la detección del estado hídrico en cubiertas abiertas, combinando índices de vegetación e información térmica obtenida de una serie temporal de 6 años de imágenes del

sensor ASTER. Para ello se ha usado información de más de 1000 parcelas de olivar, en secano y regadío.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Zona del estudio

El estudio se realizó en una zona de 60 km x 60 km en el sureste de la provincia de Sevilla, en el sur de España (37º 18' N, 4º 42' W). El clima en la zona es mediterráneo, con una precipitación media anual de alrededor de 450 mm, que se concentra desde otoño a primavera, y una evapotranspiración de referencia (ETo) de aproximadamente 1250 mm. La zona de estudio se encuentra a una altura de 500 m sobre el nivel del mar, siendo en general llana. En esta zona se monitorizaron, entre los años 2000 a 2006, 1076 parcelas de olivar con diferentes marcos de plantación y densidad de cultivo. De estas parcelas, 134 fueron olivar de regadío (regadas por goteo), y 942 fueron parcelas de olivar de secano (Figura 4.1). Una cooperativa local ('Arbequisur') proporcionó información detallada del período 2000 al 2006 de estas 1076 parcelas, incluyendo localización, superficie, densidad de árboles y manejo hídrico (riego o secano) para cada una de las parcelas durante esos años.





(b)

Figura 4.1 a) Imagen de la zona del estudio adquirida el 21 de septiembre de 2005 con el sensor ASTER. Las parcelas de olivar en regadío están coloreadas en azul y las parcelas en secano en rojo. b) Detalle de una parte de la zona del estudio, donde se muestra una selección de parcelas incluidas en el estudio.

4.2.2 Procesamiento de las imágenes ASTER

Se adquirieron imágenes de la zona de estudio tomadas con el sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), uno de los 5 instrumentos a bordo del satélite TERRA lanzado por la NASA en 1999. El sensor tiene 3 bandas espectrales en la región espectral del visible y en el infrarrojo cercano (VNIR), 6 bandas en el infrarrojo de onda corta (SWIR), y 5 bandas en el infrarrojo térmico (TIR), con 15, 30, y 90 metros de resolución espacial, respectivamente. Las imágenes se adquirieron para el periodo de 6 años, comprendidos entre el 2000 y el 2006, incluyendo imágenes de verano y de invierno. Las imágenes se tomaron a las 11:30 GMT, lo cual corresponde a las 13:30 h y las 12:30 h hora local, para verano e invierno respectivamente. Para la fecha y la hora de la adquisición de cada imagen se obtuvieron datos meteorológicos, incluyendo la temperatura del aire en una estación meteorológica localizada a 30 km del área de estudio. Las imágenes ASTER Level-1A se procesaron aplicando métodos de corrección radiométrica y atmosférica, aplicándose los coeficientes radiométricos y los datos de georreferenciación para obtener imágenes Level-1 B.

4.2.2.1 Temperatura

La temperatura de superficie (Ts) se obtuvo a partir de las bandas térmicas del sensor ASTER usando el método TES (*Temperature and Emissivity Separation*) (Gillespie *et al.*, 1998). Se han usado dos imágenes de temperatura AST-08 (ASTER *Temperature Standard Products*), una de primavera y otra de verano, para validar la obtención de la temperatura de superficie a partir de los productos L1a, usando el método TES para el resto de las imágenes ASTER, para las cuales los productos AST-08 no estaban disponibles (Figura 4.2). Los coeficientes de determinación obtenidos fueron r²=0,998 para la imagen de abril de 2001 (Figura 4.2a) y r²=0,87 para la imagen de junio de 2001 (Figura 4.2b), obteniéndose desviaciones estándar de 0,1 K (abril de 2003) y de 1,4 K (junio de 2001). Aunque las diferencias obtenidas en Ts, entre las imágenes AST-08 y las obtenidas a partir de las imágenes L1a, llegaron a 1,4 K para la imagen de verano, la comparación realizada para ambas escenas sugiere la validez del método usado

para estimar Ts mediante el método TES, para toda la serie de imágenes ASTER L1a ASTER usadas en este estudio.



(b)

Figura 4.2 Relaciones obtenidas entre temperatura de superficie (método TES) para las imágenes ASTER L1a y los productos estándar (AST-08) para: a) para la imagen del 12 de marzo de 2003, y b) para la imagen del 22 de julio de 2001.

4.2.2.2 Índices de vegetación

La radiancia at-sensor fue convertida en reflectancia TOA (*top-of-atmosphere* reflectance) usando la Ecuacion 4.1 (Chander & Markham, 2003) y simulación con MODTRAN:

$$\rho_P = \frac{\Pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s}$$
[4.1]

donde ρ_P es la reflectancia, L_{λ} la radiancia espectral *at-sensor*, d la distancia entre la tierra y el sol en unidades astronómicas, obtenida de las efemérides astronómicas, ESUN $_{\lambda}$ la irradiancia solar exoatmosférica, y θ_{S} el ángulo solar cenital en grados. Los valores $ESUN_{\lambda}$ se obtuvieron a partir del espectro solar extraterrestre (newkur), que se encuentra en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN (Berstein & Roberston, 1989) filtrado para las bandas del VNIR de ASTER. La corrección atmosférica se realizó usando MODTRAN y el dato de vapor de agua adquirido de una estación AERONET (Aerosol Robotic Network) ubicada a 170 km del área de estudio. Se usaron distintos índices ópticos, relacionados con la estructura y con las condiciones de la vegetación (Zarco-Tejada et al., 2005) (Tabla 4.1) para estudiar su potencial para detectar los efectos de los distintos manejos del riego, incluyendo el tradicional NDVI (Rouse et al., 1974), G (greenness index), MTVI₁ (Haboudane et al., 2004), MCARI₁ (Haboudane et al., 2004), MTVI₂ (Haboudane et al., 2004), MCARI₂ (Haboudane et al., 2004), MSAVI (Qi et al., 1994), y OSAVI (Rondeaux et al., 1996). Estos índices se calcularon usando las bandas ASTER del visible y del infrarrojo cercano de las imágenes adquiridas sobre la zona de estudio, para detectar los potenciales cambios estructurales de la vegetación causados por el estado hídrico de cada parcela de estudio. Por lo tanto, para cada parcela se calcularon la temperatura de superficie y los índices de vegetación estructurales durante 6 años.

Tabla 4.1	Índices	de	vegetación	usados	en	este	estudio
1 abia 4.1	multus	uc	vegetacion	usauos	un	USIC	cstudio.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	NDVI =($R_{NIR} - R_{red}$)/($R_{NIR} + R_{red}$)	Rouse et al. (1974)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVI1)	$MTVI_{1} = 1.2* [1.2* (R_{800} - R_{550}) - 2.5* (R_{670} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVI2)	$\text{MTVI}_{2} = \frac{1.5^{*} [1.2^{*} (\text{R}_{800} - \text{R}_{550}) - 2.5^{*} (\text{R}_{670} - \text{R}_{550})]}{\sqrt{(2^{*} \text{R}_{800} + 1)^{2} - (6^{*} \text{R}_{800} - 5^{*} \sqrt{\text{R}_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane et al. (2004)
Greenness Index (G)	$G = R_{554}/R_{677}$	
Improved SAVI with self- adjustment factor L (MSAVI)	$MSAVI = \frac{1}{2} \left[2^* R_{800} + 1 - \sqrt{(2^* R_{800} + 1)^2 - 8^* (R_{800} - R_{670})} \right]$	Qi et al. (1994)
Optimized Soil- Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	OSAVI = $(1 + 0.16)$ * $(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI1)	$MCARI_{1} = 1.2* [2.5* (R_{800} - R_{670}) - 1.3* (R_{800} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI2)	$MCARI_{2} = \frac{1.5^{*} [2.5^{*} (R_{800} - R_{670}) - 1.3^{*} (R_{800} - R_{550})]}{\sqrt{(2^{*}R_{800} + 1)^{2} - (6^{*}R_{800} - 5^{*} \sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane et al. (2004)

4.2.3 Datos auxiliares

4.2.3.1 Modificación del vectorial

La localización geográfica y la identificación de cada parcela de estudio se llevó a cabo mediante un vectorial (Figura 4.3 a), usando el software ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), USA) para extraer los

datos de cada parcela individual bajo estudio. Las parcelas fueron filtradas de manera que sólo las que su tamaño fuera mayor que un píxel ASTER entraran en el estudio, exigiéndose una coincidencia de al menos un 70 % entre el vectorial y el correspondiente píxel puro de ASTER. Para ello usando el software ArcGIS se hizo intersección entre el vectorial y el GRID de la imagen ASTER (Figura 4.3 b) seleccionándose y eliminándose aquellas partes en las que dentro de un píxel ASTER teníamos una intersección de menos del 70 % con el vectorial (Figura 4.3 c), uniéndose de nuevo todas las partes para crear el nuevo vectorial (Figura 4.3 d). Esta metodología se aplicó a cada parcela y a cada una de las imágenes, eliminando las parcelas de un tamaño menor que el píxel ASTER (90 m x 90 m).



Figura 4.3 Proceso de modificación del vectorial: a) ejemplo del vectorial original de una parcela, b) intersección con la malla ASTER, c) selección de las zonas en las que malla y vectorial coinciden en menos de un 70% y d) nuevo vectorial.

4.2.3.2 Obtención del porcentaje de cobertura vegetal

Debido a la gran heterogeneidad que hay entre las distintas parcelas, con distintos marcos de plantación, cobertura vegetal e índice de área foliar, fue necesario establecer un criterio para poder comparar las temperaturas de las distintas parcelas. La comparación entre parcelas se hizo en función del porcentaje de cobertura vegetal, a fin de evaluar la viabilidad de la detección de distintos niveles de estado hídrico entre parcelas con suelo y cobertura vegetal comparables. El porcentaje de cobertura vegetal se estimó para cada parcela usando imágenes pancromáticas ortorectificadas de 0,5 m de resolución tomadas sobre el área de estudio (Junta de Andalucía, 2005). El lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language software) (ITT Corporation, NY, USA) se usó para realizar una clasificación isodata (Tou & González, 1974) a cada parcela, permitiendo la separación entre suelo y píxeles puros de vegetación (Figura 4.4). Esta metodología permite la identificación correcta de vegetación pura de las copas para cada parcela estudiada, a pesar de los diferentes marcos de plantación. La Figura 4.5 muestra las ortofotos adquiridas de tres parcelas con diferente tamaño, color del suelo, marco de plantación y cobertura vegetal, mostrando las imágenes de la banda 13 de ASTER (10,657 µm) adquirida sobre estas mismas parcelas.



(e) (f) **Figura 4.4** Ortofotos adquiridas sobre tres parcelas de olivar con porcentajes de cobertura del 17% (a), 23% (c), y 51% (e), mostrando su correspondiente clasificación isodata (b,d,f).





(e) (f) **Figura 4.5** Ortofotos adquiridas sobre las tres parcelas de olivar con un porcentaje de cobertura del 17% (a), 23% (c), y 51% (e), mostrando la imagen ASTER correspondiente de la banda 13 (10.657 μm) (b,d,f).

4.2.4 Análisis de los datos ASTER

La temperatura media de cada parcela se obtuvo para cada imagen ASTER en función de distintos intervalos de porcentaje de cobertura, que variaron entre el 15% y el 55%, evaluando las diferencias de temperatura entre parcelas en secano y en regadío con niveles similares de cobertura vegetal. Se hizo una comparación parcela a parcela considerando un "caso de acierto" cuando una parcela de regadío alcanzó temperaturas más bajas y valores más altos de índice de vegetación que una parcela de secano con el mismo porcentaje de cobertura. Por lo tanto, la hipótesis en estudio afirma que las parcelas de regadío alcanzan temperaturas de copa más bajas debido a la mayor conductancia de la cubierta y normalmente a valores mayores de densidad de vegetación, asumiendo un porcentaje de vegetación similar dentro del píxel ASTER. Adicionalmente, se realizaron comparaciones de temperatura parcela a parcela con el mismo porcentaje de cobertura vegetal a la vez que con el mismo NDVI. Esta restricción se impuso para evaluar la capacidad de la temperatura de la cubierta de detector efectos térmicos asociados a los distintos manejos de riego, independientemente de los efectos causados por las distintas densidades de vegetación.

Se calculó un índice acumulativo que usó la información de temperatura del píxel (menos la del aire) y el NDVI de toda la serie temporal de imágenes ASTER. El ratio T-Ta / NDVI busca potenciar el comportamiento de T-Ta y de la densidad de vegetación en función del estado hídrico. El indicador T-Ta es menor para parcelas en regadío, mientras que NDVI es generalmente mayor, en comparación con las parcelas de secano. La serie de datos de 6 años de imágenes ASTER se usó para calcular un índice acumulativo (de la serie temporal de 6 años) para cada parcela, que incluye T-Ta y NDVI.

Finalmente se aplicó una clasificación supervisada con el algoritmo de distancia de Mahalanobis a la información del visible, infrarrojo cercano y de temperatura de una imagen ASTER de verano (6 de julio de 2006), y de toda la serie temporal de 6 años de imágenes ASTER (Figura 4.6). Se obtuvieron 2 clases: secano y regadío, utilizándose la mitad de las parcelas (tanto de riego como de secano) para entrenar la clasificación y la otra mitad para comprobar su funcionamiento, obteniendo las matrices de confusión para cada caso. Se utilizó

para entrenar y comprobar la clasificación, el mismo número de parcelas para cada porcentaje de cobertura vegetal.



Figura 4.6 Clasificación supervisada realizada para la serie de 6 años de imágenes ASTER en la que se obtuvieron 2 clases: clase regadío (azul) y clase secano (naranja). Las parcelas de entrenamiento en regadío se muestran en color azul y las parcelas de entrenamiento en secano se muestran en color rojo.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Relaciones entre la temperatura efectiva del píxel ASTER y el estado hídrico de la vegetación.

Se encontraron diferencias de temperatura detectables entre parcelas tanto en secano como en regadío, trabajando con la temperatura media de las parcelas en secano y en regadío para diferentes intervalos de cobertura (Figura 4.7).



Figura 4.7 Temperaturas medias obtenidas a partir de las imágenes ASTER en función del porcentaje de cobertura vegetal, para olivares en regadío y en secano, para la imagen a) del 21 de septiembre de 2005, b) del 6 de julio de 2006, c) del 12 de diciembre de 2000 y d) del 2 de enero de 2002.



El estudio se realizó para imágenes de invierno y de verano, con la idea de evaluar las diferencias de temperatura en los periodos de máximo y de mínimo estrés hídrico del cultivo. Las parcelas regadas mostraron en verano valores más bajos de temperatura que las parcelas en secano, para el mismo intervalo de porcentaje de cobertura, mientras que en invierno las diferencias de temperatura entre secano y regadío disminuyeron, debido a la menor demanda evaporativa y a menores diferencias en el contenido de agua en el suelo entre secano y regadío por lo que los niveles de transpiración se igualan. Las diferencias de temperatura entre parcelas en regadío y en secano llegaron a 2 K en verano, para parcelas con un porcentaje de cobertura entre el 20% y 30% (Figura 4.7a, b). Estos resultados se encontraron tanto para la imagen del 21 de septiembre de 2005 como para la imagen del 6 de julio de 2006. La Figura 4.7c,d muestra que las diferencias decrecieron hasta 0,5 K para las imágenes de invierno (12 de diciembre de 2000 y 2 de enero de 2002). Estos resultados demuestran que la temperatura de la parcela como indicador del estado hídrico en cultivos no homogéneos, es potencialmente detectable usando imágenes ASTER. Consistentemente, las parcelas con porcentaje de cobertura más bajo mostraron temperaturas de píxel más altas, tanto en las imágenes de invierno como en las imágenes de verano, debido a la influencia del suelo.

Se obtuvieron las diferencias entre la temperatura de la parcela (temperatura de efectiva) (T) menos la temperatura del aire (Ta) en función de los dos manejos (riego y secano), y para distintos intervalos de porcentajes de cobertura vegetal, usando la serie completa de imágenes ASTER entre los años 2000 y 2006 (Figura 4.8). Los cambios estacionales en los valores de T-Ta para las parcelas tanto en secano como en regadío son debidos principalmente a la influencia del suelo en el píxel ASTER, variando de 0 K (invierno) a 20 K (verano). A pesar de los altos valores de T-Ta obtenidos en verano (20 K), estos valores son consistentes con los obtenidos anteriormente agregando la información de vegetación, suelo y sombras, obtenida con el sensor aerotransportado de alta resolución AHS (Apartado 3.4.). En este estudio, los valores de Tc-Ta pasaron de ser 2 K (calculados para vegetación pura de las copas) a mas de 20 K cuando se agregó la vegetación y los píxeles de suelo.



Figura 4.8 Temperatura (menos temperatura del aire) media obtenida a partir de las imágenes ASTER, en función del porcentaje de cobertura, para olivares en regadío y en secano, incluyéndose toda la serie temporal de imágenes.

Las parcelas en regadío mostraron valores más bajos de temperatura que las parcelas de secano, con similar porcentaje de cobertura, para todo el periodo de estudio excepto para invierno, en el que el cultivo no sufre estrés hídrico. No obstante, el mismo porcentaje de cobertura puede corresponder a diferentes densidades de vegetación, como cabría esperar en las parcelas de riego, donde generalmente se obtienen mayores densidades de área foliar en comparación con las parcelas de secano. Por lo tanto, es necesario hacer una comparación muy cuidadosa de las diferencias térmicas cuando se considere un porcentaje de cobertura similar, así como similar densidad de vegetación, para lo cual es necesario usar de manera combinada indicadores tales como temperatura, porcentaje de vegetación y NDVI.

4.3.2 Evaluación de la temperatura y de los índices de vegetación para la detección del manejo de riego.

El objetivo de esta parte del estudio fue evaluar la capacidad de la temperatura y de distintos índices de vegetación para la detección del estado hídrico de las parcelas de olivar. Se analizaron todas las comparaciones posibles entre parcelas de regadío y de secano, con el mismo porcentaje de cobertura, realizándose más de 2000 comparaciones. Se contabilizó el número de casos en los cuales se cumplía o fallaba la hipótesis de que las parcelas en regadío tendrían menor temperatura y mayor índice de vegetación que las parcelas en secano.

4.3.2.1 Estudio de la temperatura y de los índices de vegetación para cada imagen individual

La Tabla 4.2 muestra el porcentaje de acierto para la temperatura y para los distintos índices de vegetación propuestos. Todos los índices propuestos fueron capaces de detectar diferencias entre parcelas en secano y en regadío, asociadas al uso de riego. Los índices MTVI2 y MCARI2, que son más resistentes a la influencia del suelo, presentaron ligeramente mejores resultados que el resto.

Tabla 4.2 Porcentaje de acierto para la hipótesis de estudio (parcelas en regadío tienen temperatura más baja y mayor índice de vegetación que las parcelas en secano) para todas las comparaciones entre parcelas en regadío y secano con el mismo porcentaje de cobertura.

Parámetro	Nivel de acierto (%)							
	05/07/2000	12/12/2000	22/06/2001	02/01/2002	25/04/2003	21/09/2005	06/07/2006	
T (K)	51	46	56	39	55	66	64	
NDVI	63	46	72	54	66	78	75	
MTVI1	66	47	71	52	66	78	76	
MTVI2	68	47	72	54	67	78	77	
G	62	49	62	61	63	67	68	
MSAVI	65	47	73	49	66	78	74	
OSAVI	64	47	73	52	67	78	76	
MCARI1	66	47	71	52	66	78	76	
MCARI2	68	47	72	54	67	78	77	

4.3.2.2 Estudio de la temperatura y de los índices de vegetación para la información acumulada de toda la serie temporal ASTER

La variación de la temperatura, NDVI y T-Ta / NDVI para la serie temporal de imágenes ASTER (Figura 4.9), muestra los valores medios de las parcelas con porcentajes de cobertura con entre el 24% y el 25% (29 parcelas, 9 de ellas de regadío). Se puede observar como las parcelas en regadío tuvieron mayores valores de temperatura que las de secano para las imágenes de primavera y de verano, alcanzando diferencias de 2 K, mientras que estas diferencias desaparecieron en invierno. Consistentemente, el NDVI de las parcelas de regadío fue mayor que el de las de secano para todo el periodo de estudio. Los resultados indicaron que el índice combinado T-Ta / NDVI potenció las propiedades de la temperatura y del NDVI para detector diferencias entre parcelas en regadío y en secano, siendo sensible a la ausencia de déficit hídrico en invierno.



Figura 4.9 Variación del valor medio de temperatura (a), el valor medio de NDVI (b), y el valor medio de (T-Ta)/NDVI (c), durante el periodo de estudio para las parcelas en regadío y en secano con porcentajes de cobertura entre un 24 y un 25%.



Se obtuvieron los valores acumulados para todo el periodo de estudio (6 años) de la temperatura, NDVI y T-Ta / NDVI a partir de la serie temporal de imágenes ASTER (Tabla 4.3). El valor acumulado de T-Ta / NDVI fue el mejor indicador para detectar las diferencias debidas al distinto estado hídrico entre las parcelas de secano y regadío, obteniendo un porcentaje de acierto del 78% con respecto a la hipótesis de que las parcelas en regadío tienen un valor más bajo del índice T-Ta/NDVI que las parcelas en secano. Además, los resultados que aparecen en la Tabla 4.3 demuestran que se obtiene una mejora en la detección del estado hídrico de la parcela cuando en vez de usar una sola imagen ASTER se usa una serie temporal.

	Nivel de acierto (%)				
Fecha	T-Ta (K)	NDVI	(T-Ta)/NDVI (K)		
05/07/2000	52	62	65		
12/12/2000	48	47	45		
22/06/2001	55	72	72		
02/01/2002	39	58	41		
25/04/2003	58	72	68		
21/09/2005	60	76	77		
06/07/2006	58	76	74		
Valor acumulado	61	68	78		

Tabla 4.3 Porcentaje de acierto de todas las comparaciones entre parcelas de secano y de regadio con el mismo porcentaje de cobertura.

La Figura 4.10 muestra una imagen ASTER de una parte de la zona de estudio, donde están marcadas distintas parcelas en secano y regadío (Figura 4.10a), y su correspondiente valor de T-Ta / NDVI acumulado para toda la serie temporal ASTER (Figure 4.10b). El índice acumulado se normalizó entre 0 y 1, mostrando que las parcelas con valores del índice más bajos correspondieron a parcelas en regadío. No obstante, es necesario usar este parámetro con cuidado para identificar parcelas de regadío y de secano, ya que necesita ser usado con niveles similares de porcentaje de vegetación.



Figura 4.10 a) Zona de una imagen ASTER tomada el 21 de septiembre de 2005 donde se pueden ver algunas parcelas en regadío (azul) y en secano (rojo); b) valor normalizado de índice acumulado (T-Ta)/NDVI para todo el periodo de estudio, calculado para cada parcela.



4.3.2.3 Evaluación de la temperatura eliminando los efectos de las distintas densidades de vegetación

Se realizó una restricción más para minimizar los efectos causados por las distintas densidades de vegetación en la temperatura del píxel cuando se trabaja con la resolución ASTER (lo cual es especialmente importante para cultivos abiertos). Se fijaron tanto el NDVI como el porcentaje de cobertura en el test realizado para comparar las temperaturas de las parcelas en relación al estado hídrico (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Porcentajes de acierto de la temperatura para todas las							
comparaciones entre parcelas de reg	gadío y de secano, con el mismo						
porcentaje de cobertura y el mismo N	DVI.						
Fecha	Porcentaje de acierto (%)						
5/07/2000	57						
12/12/2000	38						
22/06/2001	65						
2/01/2002	41						
25/04/2003	65						
21/09/2005	65						
6/07/2006	62						

Incluso bajo estas condiciones de restricción, comparando parcelas con el mismo porcentaje de cobertura y el mismo NDVI, la temperatura de la parcela fue capaz de detectar diferencias entre parcelas de secano y de regadío en verano, disminuyendo en invierno en ausencia de estrés hídrico. La viabilidad de detectar distintos niveles de estrés hídrico en cultivos abiertos, contribuye con información adicional a los métodos tradicionales basados solamente en el NDVI como indicador de la densidad de la vegetación. En otras palabras, parcelas con el mismo porcentaje de cobertura y de densidad de vegetación mostraron diferencias en la temperatura del píxel, asociadas a diferencias en la tasa de transpiración debidas a diferencias en el nivel de estrés hídrico de las parcelas. En este caso, las diferencias de temperatura entre parcelas con y sin déficit hídrico no pueden ser explicadas por cambios en el porcentaje de cobertura de la cubierta o en la densidad de vegetación asociados al estado hídrico del cultivo. La Figura 4.11 muestra un ejemplo de dos parcelas con el mismo porcentaje de cobertura (25%) y el mismo NDVI (0,18) y su

correspondiente imagen ASTER de temperatura obtenida para el 6 de julio de 2006. En este caso, las diferencias de temperatura obtenidas entre estas dos parcelas llegaron a 2 K, diferencias que pueden asociarse a las diferencias en el estado hídrico del cultivo en las parcelas en regadío (Figura 4.11a, b) y en las parcelas en secano (Figura 4.11c, d).



Figura 4.11 Ortofotos adquiridas para una parcela de regadío (a) y una de secano (b) con el mismo porcentaje de vegetación (25%) y el mismo NDVI (0.18), mostrando sus correspondientes imágenes ASTER de temperatura (b,d).

4.3.2.4 Resultados de la clasificación supervisada

Las Tablas 4.4 y 4.5 muestran las matrices de confusión resultantes de la clasificación supervisada realizada usando la información del visible, infrarrojo cercano y de la temperatura, para una sola imagen de verano (Tabla 4.4) y para la serie completa de imágenes ASTER (Tabla 4.5). El análisis de la matriz de confusión permite la evaluación de la fiabilidad cómo: i) la fiabilidad de productor, que es 1-error de omisión, donde el error de omisión corresponde a los puntos que pertenecientes a una misma clase son asignados a otra; ii) la fiabilidad de usuario, que es 1-error de comisión, que corresponde al número de puntos que fueron asignados a una clase cuando en realidad pertenecían a otras clases; y iii) la fiabilidad global, que es el número de píxeles clasificados correctamente dividido entre el número total de píxeles. El coeficiente kappa (k) da una valoración de la precisión total para la clasificación basada en los errores de comisión y omisión de clases, midiendo la diferencia entre los resultados medidos analíticamente y los que se habrían obtenido realizando una asignación al azar.

La Tabla 4.4 muestra las precisiones para la identificación de parcelas de olivar en secano y regadío, obtenidas usando la imagen de verano del 6 de julio de 2006, habiéndose obtenido unas precisiones de productor del 51% para la clase riego y de un 69% para la clase secano. Las fiabilidades de usuario obtenidas fueron del 28% para riego y del 86% para secano. El kappa obtenido fue 0,16 con una fiabilidad global del 66%. Los resultados obtenidos con la clasificación realizada con una sola imagen mejoraron considerablemente con el uso de toda la serie temporal de imágenes ASTER (Tabla 4.5). Los resultados obtenidos para toda la serie ASTER fueron: fiabilidad de productor del 65% y del 78%, para las clases regadío y secano respectivamente. Siendo las fiabilidades de usuario del 39% para regadío y del 91% para secano. En este caso, kappa fue 0,34 y la fiabilidad global del 75%.

Puntos de verdad					
Regadío	Regadío Secano 7		Precisión de usuario (%)		
4964	12896	17860	27.79		
4667	29058	33725	86.16		
9631	41954	51585			
51.54	69.26		Precisión total = 65.95 % Kappa κ = 0.16		
	Puntos do Regadío 4964 4667 9631 51.54	Puntos de verdad Regadío Secano 4964 12896 4667 29058 9631 41954 51.54 69.26	Regadío Secano Total 4964 12896 17860 4667 29058 33725 9631 41954 51585 51.54 69.26		

Tabla 4.4 Matriz de confusión para la clasificación supervisada de Mahalanobis usando la imagen ASTER del 6 de julio de 2006.

Tabla 4.5 Matriz de confusión para la clasificación supervisada de Mahalanobis usando toda la serie temporal de 6 años de imágenes.

Clasificación Mahalanobis	Puntos de	e verdad		
Clase	Regadío	Secano	Total	Precisión de usuario (%)
Regadío	6375	9839	16214	39.32
Secano	3359	32324	35683	90.59
Total	9734	42163	51897	
Precisión de productor (%)	65.49	76.66		Precisión total = 74.57% Καρρα κ = 0.34

Capítulo 5 Estudio de simulación con el modelo de transferencia radiativa DART
5.1 INTRODUCCIÓN

Los resultados del capítulo anterior sugieren la capacidad de detectar el estado hídrico en cultivos abiertos usando el sensor a bordo del satélite ASTER. A pesar de esto, los efectos causados por el suelo y las sombras en las cubiertas no homogéneas requieren un detallado estudio de simulación. La detección remota del estado hídrico en cultivos abiertos plantea la complejidad adicional de los efectos a nivel píxel, debidos a los efectos térmicos de los componentes soleados y las sombras, con grandes diferencias térmicas entre ellos. Esta complejidad es mayor en cultivos perennes, donde los efectos causados por el estrés hídrico en la estructura de la cubierta son menos detectables visualmente que en otro tipo de cultivos. Adicionalmente, estos cultivos están plantados en distintos marcos de plantación que determinan distintos porcentajes de cobertura que afectan tanto a los índices de vegetación (i.e. NDVI) como a la temperatura del píxel o temperatura efectiva (i.e. T-Ta), en función de los distintos componentes de la escena. Como ejemplo, dos parcelas de cultivo con distinto marco de plantación pueden tener el mismo NDVI y/o temperatura efectiva (T) dependiendo del índice de área foliar (IAF) de la copa, de la reflectancia del suelo y de la temperatura del suelo, y del conjunto de sombras debidas a la geometría de los árboles. Este hecho tiene importantes implicaciones en los modelos empíricos y de una sola capa de

estimación de la evapotranspiración (ET), que se ejecutan con NDVI y temperatura efectiva como entradas, como lo son SEBAL (*Bastiaanssen et al.*, 1998) o METRIC (Allen *et al.*, 2005), llevando potencialmente a estimaciones erróneas de ET, debido a los altos valores de T-Ta (del orden de 15-20 K) cuando Tc-Taire es solamente del orden de 2-3 K (donde Tc es la temperatura de la copa). Además, estos modelos usan el NDVI como indicador de la rugosidad de la cubierta, considerando el porcentaje de cobertura vegetal, pero generalmente no teniendo en cuenta los efectos de las sombras en cultivos abiertos.

Por lo tanto, son necesarios futuros estudios que tengan en cuenta los distintos componentes de la escena en cultivos no homogéneos, evaluando los efectos de la arquitectura de la cubierta y del suelo. Los modelos de transferencia radiativa en tres dimensiones (3-D) simulan cultivos abiertos teniendo en cuenta cada componente de la escena individualmente, separando vegetación pura, suelo y sombras (Zarco-Tejada et al., 2004; ver trabajo de Suárez et al., 2008 modelizando el índice PRI para la detección de estrés hídrico en olivar). No obstante, el uso de este tipo de modelos 3-D en el térmico no es habitual debido a lo limitado de la disponibilidad de modelos teóricos. El modelo DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) se desarrolló en un primer momento para la región de onda corta, siendo probado satisfactoriamente con medidas de reflectancia (Gastellu-Etchegorry et al., 1999) y aplicado para obtener parámetros químicos en cubiertas forestales a partir de datos de teledetección (Gastellu-Etchegorry y Bruniquel-Pinel, 2001). Actualmente, el modelo DART incluye la región del infrarrojo térmico (Guillevic et al., 2003), simulando la propagación y las interacciones de la radiación TIR, emitida por la cubierta o proveniente de la atmósfera, entre la cubierta de arquitectura tridimensional.

El objetivo del estudio descrito en este capítulo es evaluar usando el modelo DART, para simular cultivos abiertos, los efectos de la cobertura vegetal, el IAF de la copa y la temperatura del suelo en la temperatura de la cubierta, usada para detectar niveles del estado hídrico del cultivo. Finalmente se discutirán las implicaciones potenciales de la estimación de la evapotranspiración mediante modelos de una sola capa que usan datos de teledetección, en cubiertas no homogéneas.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo de tranferencia radiativa DART (*Discrete Anisotropic Radiative Transfer*) se usó para simular escenas 3-D de olivar, con objeto de estudiar los efectos de las distintas componentes (suelo, vegetación y sombras) en la información de temperatura agregada en el píxel. El modelo DART puede funcionar simulando reflectancia o temperatura, combinando trazado de rayos y métodos de ordenadas discretos. DART está diseñado para simular distintas superficies, tanto escenas boscosas con diferentes tipos de árboles como otros componentes. La salida del modelo es una matriz 3-D de celdas que contienen material turbio para representar vegetación o material opaco, para representar superficies tales como suelo, elementos urbanos o troncos.

Las entradas que se requirieron en el modelo DART para las simulaciones hechas en este estudio fueron: i) parámetros de geometría de visión como el ángulo solar azimutal y cenital; ii) la reflectancia, y la temperatura máxima y mínima de los distintos componentes de la escena (hoja, tronco y suelo), y las características de la hoja; iii) parámetros estructurales: dimensiones de la escena y de las celdas, número de árboles, arquitectura del tronco y de la copa, y distribución espacial de los árboles. La salida del modelo es una imagen 3-D de temperatura de brillo. La Figura 5.1 muestra un ejemplo de una escena a 3-D simulando una parcela con un marco de plantación típico de un olivar de regadío.



(a)



Figura 5.1 Escena 3D de una simulación de olivar usando el modelo de transferencia radiativa DART; a) vista frontal, y b) vista en nadir.

5.2.1 Evaluación de la capacidad de agregación del modelo DART

Se evaluó el funcionamiento del modelo DART para simular escenas térmicas de cultivos abiertos (árboles), usando las imágenes aerotransportadas adquiridas como parte de la campaña del año 2005 con el sensor AHS (Capítulo 3). Las imágenes térmicas AHS fueron adquiridas a las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT el 25 de julio de 2005 sobre una parcela de olivar donde se aplicaron diferentes tratamientos de riego, aplicados a bloques de 12 árboles (en el apartado 2.2.1.1 se encuentra la información detallada acerca de los tratamientos de riego). Las temperaturas del suelo sombreado y soleado, así como las de las copas puras, estuvieron monitorizadas con sensores de infrarrojo IRTS en cada una de las pasadas del avión sobre la zona de estudio. Para cada paso del avión, con el sensor AHS se obtuvo una escena de temperatura con el modelo DART, simulando cada uno de los bloques de cada tratamiento de riego, usando como entradas al modelo los valores de temperatura medidos en campo con los sensores IRTS (Figura 5.2). Se usaron los ángulos cenitales y acimutales para cada una de las horas de vuelo 7:30, 9:30 y 12:30 GMT el día 25 de julio de 2005, así como el IAF y los parámetros estructurales de cada uno de los olivos medidos en el campo. Los parámetros ópticos utilizados son los que se encuentran en Zarco-Tejada et al. (2004). La imagen de temperatura de brillo simulada con DART fue obtenida en modo monoespectral para la banda por defecto del modelo que va de 10 a 10,2 µm, ejecutándose el modelo sin simulación atmosférica. Para la obtención de la temperatura de brillo a partir de las imágenes AHS se utilizó la banda 75 (de 9,8 a 10,2 µm), aplicando corrección atmosférica a la información obtenida por el sensor para obtener la temperatura de brillo de la superficie.



Figura 5.2 Imágenes de temperatura simuladas con el modelo DART para el olivar usado en este estudio a las: a) 7:30 GMT; c) 9:30 GMT; y e) 12:30 GMT. Imágenes obtenidas con el sensor aerotransportado AHS el día 25 de julio de 2005 a las: b) 7:30; d) 9:30, y f) 12:30 GMT.

La Figura 5.3 muestra la relación obtenida entre las temperaturas de los bloques con distinto tratamiento de riego simuladas con el modelo DART, a partir de datos externos obtenidos en campo, y las temperaturas obtenidas con el sensor

AHS, a las tres horas de vuelo, obteniéndose errores cuadráticos medios (RSMEs) de 0,4, 0,8 y 0,6 K a las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT respectivamente. Estos resultados demostraron la capacidad del modelo DART de agregar los distintos componentes de la escena en cultivos abiertos, lo cual es un objetivo crítico requerido para el resto del estudio.



Figura 5.3 Relaciones obtenidas entre la temperatura simulada con DART y la obtenida con el sensor AHS para la información agregada de cada uno de los bloques de cada tratamiento de riego usados en este estudio.

5.2.2 Simulación de distintos escenarios de olivar con el modelo de transferencia radiativa DART

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar los efectos de los distintos componentes del píxel de temperatura para distintas cubiertas. Se analizaron los efectos de las distintas entradas del modelo DART en las diferencias potenciales esperadas entre parcelas de olivar en secano y en regadío. El estudio de modelización consistió en simular parcelas variando el porcentaje de cobertura vegetal, el IAF de la copa y las temperaturas del suelo, evaluando los efectos que los cambios de la temperatura de la copa, dependientes del estrés hídrico,

producirían en la información agregada del píxel ASTER. Se obtuvieron diferentes niveles de cobertura vegetal, variando el número de árboles en la escena y las distancias entre ellos (marco de plantación). La Figura 5.4 muestra las imágenes térmicas simuladas en nadir para un olivar con IAF=3 y porcentaje de cobertura del 15% (Figura 5.4a), 35% (Figura 5.4b) y 55% (Figura 5.4c).



Figura 5.4 Imágenes de temperatura simuladas con el modelo DART para un olivar con un porcentaje de cobertura del a) 15%, b) 35%, y c) 55%.

Se usaron los ángulos azimutal y cenital solar para la hora de paso del sensor ASTER sobre la zona de estudio, (11:30 GMT) el día 6 de julio de 2006. La temperatura del tronco se fijó como la temperatura del aire de ese día, y los valores medios de temperatura de suelo y de hoja se fijaron como los medidos el mismo día en la zona del estudio experimental descrito anteriormente (apartado 2.2.1.1). Los parámetros ópticos de la hoja usados fueron los presentados en Zarco-Tejada *et al.* (2004). El modelo DART se ejecutó en modo monoespectral, con una banda que va de 10 a 10,2 μ m, obteniendo una imagen de temperatura de brillo como salida. La Tabla 5.1 muestra los valores nominales usados para las distintas entradas, requeridos para construir las escenas 3-D de las simulaciones DART, así como el intervalo de variación de los parámetros usados para realizar este estudio.

Parámetros de dirección	Valores nominales y rango
Ángulo solar cenital (°)	165.4
Ángulo solar acimutal (°)	184.7
Propiedades de dispersión y temperaturas	Valores nominales y rango
Reflectancia del Tronco	0.03
Tmin del tronco (K)	305
Tmax del tronco (K)	305
Reflectancia del suelo	0.05
T min del suelo (K)	212-324
Tmax del suelo(K)	322-334
Dimensión de la hoja (m)	0.01
Reflectancia adaxial de la hoja	0.01
Reflectancia abaxial de la hoja	0.01
Transmitancia de la hoja	0.01
Tmin de la hoja(K)	306-311
Tmax de la hoja(K)	306-311
Parámetros estructurales	Valores nominales y rango
Dimensiones de la celda(x, y, z) (m)	0.5
Dimensiones de la escena (x,y) (m)	90
Número de árboles	64-224
Altura media del tronco por debajo de la copa (m)	1
Altura del tronco dentro de la copa (m)	1
Diámetro del tronco dentro de la copa (m)	1
Diámetro del tronco debajo de la copa (m)	1
Altura de la copa (m)	5
IAF de copa	1-6
Distancia entre árboles (dx) (m)	8-11
Distancia entre árboles (dy) (m)	8-11
Eje principal del elipsoide de la copa (m)	5
Eje secundario del elipsoide de la copa (m)	5

Tabla 5.1 Valores nominales e intervalo de los parámetros usados en el estudio de simulación de olivar.

Finalmente, se realizó un estudio para evaluar la relación entre la temperatura de copa y la temperatura efectiva, en verano y en invierno. El objetivo fue evaluar el *offset* existente entre el píxel de temperatura (agregando vegetación, suelo soleado y sombras) y la temperatura de la copa (vegetación pura) en función del porcentaje de cobertura. La temperatura de la copa menos la temperatura del aire (Tc-Ta) se varió entre 1 y 5 K en verano, y entre -2 y 2 K en invierno, como se observó en la serie de datos adquirida durante 2 años con los sensores IRTS-P instalados sobre los olivos. La temperatura del suelo menos la temperatura del aire (Tsuelo –Ta) se obtuvo a las 11:30 GMT (hora del paso de ASTER sobre la zona de estudio), de la misma zona de estudio nombrada anteriormente, donde se instalaron permanentemente sensores de infrarrojo encima de las copas de los olivos (apartado 2.2.1.1). La Tabla 5.2 muestra los valores nominales y los intervalos usados en este estudio de simulación.

sindración con DART, para la comparación	Simula side de	
	Simulation de	Simulation de
	verano	invierno
	Valores nominales y	Valores nominales
Parámetros de dirección	rango	y rango
Ángulo solar cenital (°)	165.4	119
Angulo solar acimutal (°)	184.7	168
Propiedades de dispersion y	Valores nominales y	Valores nominales
temperaturas	rango	y rango
Reflectancia del Tronco	0.03	0.03
Tmin del tronco (K)	301.45	287.75
Tmax del tronco (K)	301.45	287.75
Reflectancia del suelo	0.05	0.5
T min del suelo (K)	320.45	293.55
Tmax del suelo(K)	330.45	283.55
Dimensión de la hoja (m)	0.01	0.01
Reflectancia adaxial de la hoja	0.01	0.01
Reflectancia abaxial de la hoja	0.01	0.01
Transmitancia de la hoja	0.01	0.01
Tmin de la hoja(K)	302.45-306.45	285.75-289.75
Tmax de la hoja(K)	302.45-306.45	285.75-289.75
	Valores nominales y	Valores nominales
Parámetros estructurales	rango	y rango
Dimensiones de la celda(x, y, z) (m)	0.5	0.5
Dimensiones de la escena (x,y) (m)	90	90
Número de árboles	64-186	64-186
Altura media del tronco por debajo de la		
copa (m)	1	1
Altura del tronco dentro de la copa (m)	1	1
Diámetro del tronco dentro de la copa (m)	1	1
Diámetro del tronco debajo de la copa (m)	1	1
Altura de la copa (m)	5	5
LAI de copa	2	2
Distancia entre árboles (dx) (m)	8-11	8-11
Distancia entre árboles (dy) (m)	8-11	8-11
Eje principal del elipsoide de la copa (m)	5	5
Eje secundario del elipsoide de la copa (m)	5	5

Tabla 5.2 Valores nominales e intervalos de los parámetros usados en el estudio de simulación con DART, para la comparación entre Tcopa y Tpixel DART.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Evaluación de la influencia de los distintos componentes en los valores finales de temperatura efectiva

Se compararon los resultados obtenidos con las imágenes térmicas ASTER bajo diferentes porcentajes de cobertura, IAF y condiciones de suelo, con los resultados obtenidos de las simulaciones con el modelo de transferencia radiativa DART. El estudio de simulación realizado con DART se enfocó en evaluar los efectos del porcentaje de cobertura vegetal, el IAF y la temperatura del suelo en la temperatura efectiva ASTER (Figura 5.5). En particular, con las simulaciones se evaluaron las diferencias potenciales entre parcelas en secano y en regadío, en función de las mencionadas características del suelo y de la cubierta.

La Figura 5.5a muestra la variación de las diferencias de temperatura entre parcelas en secano y regadío, en función del porcentaje de cobertura, asumiendo diferencias entre niveles de estrés hídrico, variando las diferencias de temperatura de las hojas entre 3 y 5 K. Consistentemente, se pueden observar diferencias entre las temperaturas de las parcelas en secano y en regadío, que aumentan con mayores valores del porcentaje de cobertura. Esto es debido a la menor influencia que tiene el suelo y la temperatura efectiva cuando el porcentaje de cobertura es mayor. Las diferencias de temperatura entre píxeles de secano y de regadío variaron entre 0,5 K (para un 15 % de porcentaje de cobertura) y 1,5 K (para un porcentaje de cobertura del 55%), para diferencias térmicas entre las hojas estresadas (secano) y no estresadas (regadío) de 3 K, y entre 0,8 K (15 % de porcentaje de cobertura) y 2,5 K (55% de porcentaje de cobertura), para diferencias térmicas de 5 K (entre hojas en secano y regadío). Estos resultados obtenidos a partir de simulaciones con el modelo DART son coherentes con los observados en la zona de estudio comentada en el capítulo anterior (Capítulo 4, apartado 4.2.1), en el estudio experimental realizado con imágenes ASTER para la imagen de julio 2006 (Figura 4.6b), en la que se obtuvieron diferencias entre parcelas de secano y de regadío de 0,6 K, para un porcentaje de cobertura del 15%, y de 1,1 K, para un porcentaje de cobertura del 45%.

Para estudiar los efectos del IAF en las diferencias de temperatura entre parcelas de secano y de regadío, la evaluación consistió en variar el IAF de la copa entre 1 y 6 y las diferencias de las temperaturas de las hojas entre 3 y 5 K (Figura 5.5b), como función de un porcentaje de cobertura variable del 15% al 55% para los diferentes valores de IAF de copa (Figura 5.5c). Las diferencias encontradas entre las temperaturas simuladas de parcelas en secano y en regadío apenas dependieron del IAF. Para diferencias de temperatura de 3 K, las diferencias entre la temperatura de la parcela en secano y la de regadío variaron entre 0,69 K (IAF=1) y 0,80 K (IAF=5) para porcentajes de cobertura del 25%. Aún así, el IAF de copa afectó a la diferencia Tsecano-Tregadío para píxeles con valores altos de cobertura vegetal (Figura 5.5c). Para píxeles con IAF bajo, las diferencias entre Tsecano y Tregadío fueron bajas (por debajo de 1 K para todos los niveles de cobertura vegetal), debido a los grandes efectos causados por la temperatura del suelo en el píxel ASTER agregado, lo cual hace disminuir las diferencias térmicas.

La Figura 5.5d muestra la Tsecano-Tregadío simulada en función del porcentaje de cobertura, para diferencias entre temperaturas de suelo de las parcelas de secano y regadío que van de -6 a +6 K. Lo cual se hizo para evaluar los efectos de diferentes niveles de temperatura de suelo en las parcelas de secano y regadío en función de distintos porcentajes de cobertura. Conforme a lo esperado, la temperatura del suelo afecta mucho a la diferencia Tsecano-Tregadío para píxeles de bajo porcentaje de cobertura. Las diferencias llegaron a 5,4 K para un porcentaje de cobertura del 15%, mientras que se obtuvieron 4,7 K para un porcentaje de cobertura del 55%, cuando las diferencias entre el suelo de la parcela en secano y el suelo de la parcela en regadío fue de 6 K. Por otro lado, los resultados fueron -4.5 (para un porcentaje de cobertura del 15%) y -1.4 (para un porcentaje de cobertura del 55%) cuando las diferencias de temperatura entre suelo de secano y suelo de regadío fue -6 K. Se puede observar la tendencia a converger de todas las distribuciones para porcentajes de cobertura altos (Figura 4.4d) aunque todavía muestran gran influencia en el píxel de temperatura en función de la temperatura del suelo



Figura 5.5 Simulaciones DART obtenidas de la temperatura de una parcela en secano menos la de una en regadío, en función del porcentaje de vegetación, para diferentes gradientes de temperatura de hoja en secano menos temperatura de hoja en regadío (a); efectos del IAF (LAI) de copa para distintos gradientes de de temperatura de hoja en secano menos temperatura de hoja en regadío (b); efectos del porcentaje de cobertura para distintos LAI de copa (c), y efectos del porcentaje de cobertura para distintos gradientes de temperatura del suelo de secano menos temperatura del suelo de secano menos temperatura del suelo en regadío (d).

5.3.2 Relación entre temperatura efectiva y temperatura de la vegetación y su implicación en modelos de evapotranspiración

Se realizaron una serie de simulaciones para evaluar la temperatura agregada en cultivos abiertos en función de la temperatura de la copa, para diferentes suelos y diferentes densidades de árbol en cultivos abiertos, realizándose para diferentes niveles de porcentaje de cobertura vegetal (Figura 5.6), considerando tanto el caso de verano (Figura 5.6 a) como el de invierno (Figura 5.6 b). En los resultados obtenidos para la simulación de verano se alcanzaron diferencias de temperatura entre copa y píxel de 13 K para un porcentaje de cobertura vegetal del 45%, llegando a más de 20 K para un porcentaje de cobertura del 15%, debido a la influencia del suelo. Estos resultados obtenidos para verano demuestran una sobreestimación de la temperatura de la cubierta cuando se asume la temperatura efectiva como la temperatura de la vegetación en cultivos abiertos. Los resultados que se obtuvieron de las simulaciones de invierno sugieren pequeñas diferencias entre la temperatura de la copa y la temperatura del píxel debido a las bajas temperaturas de suelo encontradas.

Las grandes diferencias encontradas para verano entre temperatura de copa y temperatura agregada (temperatura efectiva), que variaron entre 10 y 20 K dependiendo del porcentaje de cobertura, tienen importantes implicaciones en la estimación de la ET en este tipo de cultivos, que depende de la temperatura de superficie como entrada en la ecuación del balance de energía.



Figura 5.6. Relaciones entre temperatura efectiva de olivar y temperatura de la copa para diferentes porcentajes de cobertura; a) para verano y b) para invierno.

Resumen y conclusiones

Para finalizar la presente memoria y como resumen del trabajo realizado, se presentan las conclusiones obtenidas más relevantes:

i) Capítulo 2: detección del estrés hídrico en árboles mediante instrumentación.

Los resultados de las campañas de campo realizadas en los años 2004 y 2005, en una parcela experimental de olivar donde se aplicaron tres tratamientos de riego, mostraron que tanto el potencial hídrico, como la conductancia estomática y la fotosíntesis fueron afectados diferencialmente durante el periodo experimental, dependiendo del tratamiento de riego aplicado. Lo mismo ocurrió en una parcela experimental de melocotonero, en la que se aplicaron cuatro tratamientos de riego y se midió el potencial hídrico.

Los resultados de las medidas puntuales de temperatura realizadas en olivar mostraron diferencias significativas en la temperatura de copa entre árboles bien regados y con déficit hídrico, llegando a 4 K en el periodo de máximo estrés.

Tanto los sensores de infrarrojo térmico como la cámara térmica fueron capaces de detectar las diferencias de temperatura de las copas inducidas por el estrés hídrico, incluso en el caso de los melocotoneros, donde los tratamientos deficitarios de riego fueron poco acusados. La diferencia entre la temperatura de la copa y la temperatura del aire llegó a 6 K en los olivos bajo riego deficitario, mientras que fue 5 K para los árboles del tratamiento control (riego). En el caso de los melocotoneros, Tc-Ta llegó a 4 K para los árboles con tratamiento deficitario de riego mientras que en los del tratamiento control alcanzó 3 K, al final del período de riego (mediados de septiembre de 2005).

Las medidas en campo obtenidas con la cámara térmica mostraron mayor homogeneidad térmica para la copa de los árboles control (riego no deficitario), obteniendo un coeficiente de determinación de $r^2=0,48$ entre la desviación de la imagen y el potencial hídrico.

ii) Capítulo 3: detección del estrés hídrico y sus efectos en la producción y calidad del fruto, mediante teledetección térmica de alta resolución espacial

Este estudio avanza en la aplicación de métodos de teledetección térmica para la detección de estrés hídrico en cultivos no homogéneos. Las imágenes térmicas, del visible y del infrarrojo cercano, obtenidas con el sensor AHS, permitieron el estudio temporal y espacial de los efectos del estrés hídrico en la temperatura de la cubierta tanto a nivel de árbol como a nivel de parcela de tratamiento.

Los resultados obtenidos con las imágenes AHS y los sensores de infrarrojo IRT colocados encima de los árboles mostraron que las diferencias en la temperatura de la copa, asociadas con el nivel de estrés hídrico del árbol, pueden ser detectadas mediante el uso de imágenes, mostrando mayores valores de temperatura en los árboles bajo tratamientos de riego deficitario, S1 y S2, que en los árboles bajo tratamiento control (regados no deficitariamente). El error cuadrático medio obtenido para la temperatura de superficie obtenida a partir de las imágenes AHS, usando un algoritmo *split-window*, con respecto a los valores medidos por los sensores IRT, fue de 1,6 K (0,9 cuando se corrige el bias),

indicando la capacidad de AHS para obtener valores precisos de temperatura y por tanto la capacidad para detectar niveles de estrés hídrico.

Los resultados obtenidos a partir de imágenes AHS mostraron diferencias térmicas, entre árboles control y árboles bajo riego deficitario, de 2 K para olivar y de 1 K para melocotonero.

Los coeficientes de determinación obtenidos entre Tc-Ta, obtenida a partir de las imágenes AHS tomadas del olivar, y la conductancia estomática y el potencial hídrico de los olivos, llegaron a r^2 =0,60 (12:30 GMT) y a r^2 =0,49 (12:30 GMT), respectivamente, en 2005 para árboles individuales, siendo estos valores coherentes con los obtenidos en 2004, que se relacionaron con el potencial hídrico. Estos resultados sugieren que las diferencias de temperatura observadas en árboles bajo diferentes tratamientos de riego fueron debidas al distinto grado de estrés hídrico aplicado a los árboles. Los resultados obtenidos en melocotonero mostraron también una detección satisfactoria del estrés hídrico, a pesar de que los tratamientos de riegos deficitarios aplicados fueron poco acusados.

En este estudio se buscó la potencialidad de cuantificar mediante teledetección el nivel de estrés hídrico a nivel de árbol y su relación con la producción y determinados parámetros de calidad del fruto, tanto en olivar como en melocotonero. Los coeficientes de determinación obtenidos para producción y algunos parámetros de calidad del fruto mostraron una relación consistente con el nivel de estrés hídrico detectado, alcanzando valores de r²=0,95 (contenido de agua en aceituna) y r²=0,94 (calibre en melocotón) a nivel de tratamiento de riego. Estos resultados sugieren la potencialidad de la teledetección térmica de alta resolución como indicador de la producción y de algunos parámetros de calidad del fruto, afectados por el grado de estrés hídrico, que la teledetección es capaz de detectar a nivel árbol.

Los métodos presentados permitieron la generación de mapas de Tc-Ta y Tc- T_R con resolución especial de 2 m, mostrando la variabilidad espacial y diurna de la temperatura de los árboles de la parcela. Estos métodos tienen aplicaciones potenciales en el manejo de riego en cultivos abiertos, en el contexto, por ejemplo,

de la agricultura de precisión, o en la evaluación del estrés hídrico dentro de la parcela, y para predecir el impacto de éste en la producción y la calidad del fruto.

Finalmente, con objeto de estudiar las posibilidades del uso de satélites de resolución espacial media, como lo es ASTER, para la detección de estrés hídrico en cultivos abiertos, se hizo una degradación de la resolución espacial para evaluar los efectos en la temperatura de la agregación de copa, suelo y sombras, reproduciéndose también las características espectrales de ASTER a partir de los datos AHS. Los coeficientes de determinación obtenidos entre las Tc-Ta obtenidas de las imágenes AHS, sobre olivar, degradadas a resolución ASTER y el potencial hídrico llegaron a r^2 =0,81 (9:00 GMT). Estos resultados sugieren la posibilidad de aplicar las metodologías usadas en este estudio a observaciones con el sensor ASTER, para monitorizaciones globales de cultivos abiertos.

iii) Capítulo 4: detección del estado hídrico del cultivo con teledetección de resolución espacial media.

Los resultados experimentales obtenidos con 6 años de imágenes ASTER y 1076 parcelas de olivar mostraron que es posible detectar diferencias térmicas con imágenes térmicas obtenidas con el sensor ASTER relacionadas con el estado hídrico del cultivo, en cultivos abiertos. Obteniéndose en verano diferencias de más de 2 K entre parcelas en secano y en regadío con el mismo porcentaje de cobertura vegetal. Estas diferencias desaparecieron en invierno, en ausencia de estrés hídrico.

Se realizó una comparación de las diferencias entre parcelas con el mismo porcentaje de cobertura y densidad de vegetación, usando como indicadores la temperatura e índices de vegetación. Las comparaciones "campo a campo" entre parcelas en secano y regadío, con el mismo porcentaje de cobertura, mostraron que todos los índices propuestos fueron capaces de detectar diferencias consistentes entre parcelas, relacionadas con el estado hídrico.

El índice propuesto que acumula la información de Tc-Ta / NDVI para la serie temporal de 6 años de imágenes ASTER fue el mejor indicador para detectar las diferencias entre parcelas, debidas a su diferente régimen hídrico, alcanzando un porcentaje de acierto del 78% con respecto a la hipótesis según la cual las

parcelas regadas deben tener menor valor de Tc-Ta / NDVI que las parcelas en secano.

La temperatura fue capaz de detectar diferencias entre parcelas en secano y en regadío, incluso en el caso en el que se fijó NDVI (es decir, cuando se compararon parcelas con el mismo porcentaje de cobertura y el mismo NDVI), alcanzándose un porcentaje de acierto del 65%. Estos resultados sugieren que la temperatura contribuye con información adicional al NDVI para detectar niveles de estado hídrico en cultivos abiertos.

Los resultados obtenidos aplicando una clasificación supervisada a la información del visible, infrarrojo cercano y de la temperatura, de la serie de 6 años de imágenes ASTER, tuvieron una fiabilidad global del 75% y un coeficiente kappa (k) de 0,34, sugiriendo una identificación razonable de parcelas de olivar en secano y en regadío.

iv) Capítulo 5: estudio de simulación con el modelo de transferencia radiativa DART.

El modelo de transferencia radiativa DART en la región espectral del infrarrojo térmico se usó para simular diferentes escenarios de olivar, con píxeles en función del suelo, del porcentaje de cobertura y del IAF. Se realizó un estudio de validación con imágenes obtenidas con el sensor de alta resolución AHS, mostrando buenas relaciones entre las imágenes AHS, agregadas a la resolución de bloque de tratamiento, y las obtenidas con el modelo DART. Los errores cuadráticos medios obtenidos entre las escenas simuladas con DART y las imágenes obtenidas con el sensor de 0,4, 0,8 y 0,6 K para las 7:30, 9:30 y 12:30 GMT, respectivamente.

Las simulaciones demostraron la consistencia de los datos térmicos obtenidos con imágenes ASTER, según el nivel de estrés hídrico y del porcentaje de cobertura.

Un análisis de sensibilidad realizado con el modelo DART permitió la evaluación de diferentes entradas al modelo en las diferencias de temperatura

obtenidas de píxeles agregados ASTER. Conforme a lo esperado, la influencia del IAF de copa en los píxeles agregados cuando se busca detectar estrés hídrico es pequeña (la diferencia entre la temperatura de las parcelas en secano y regadío varió de 0,69 a 0,80 para IAF=1 y IAF= 6, respectivamente, para diferencias de temperatura entre hojas de 3 K). Sin embargo, la temperatura del suelo afectó mucho las diferencias de temperatura entre las parcelas en secano y en regadío, infraestimando o sobreestimando estas diferencias según la temperatura de cada uno de los suelos (se alcanzó una diferencia de píxel de 4,7 K entre parcelas en secano y regadío, cuando las diferencias entre los suelos fueron de 6 K para un porcentaje de cobertura del 55%).

Por ultimo, se evaluó usando el modelo DART, las diferencias existentes entre la temperatura de la cubierta y la temperatura efectiva cuando se trabaja con cultivos abiertos, debidas principalmente a los efectos del suelo. Las diferencias de temperatura obtenidas entre vegetación pura de las copas y la efectiva fueron de 13 K para un porcentaje de cobertura del 45%, y de 20 K para un porcentaje de cobertura del 15%, en verano. Estas elevadas diferencias entre la temperatura de la copa y la temperatura efectiva, producida en gran parte por los efectos del suelo, pueden ser fundamentales para determinar con exactitud la ET estimada en cubiertas abiertas. Esto ocurre cuando datos térmicos de teledetección son entradas en modelos de evapotranspiración basados en la ecuación del balance de energía, llevando a estimaciones erróneas del calor sensible (H). En este trabajo se demuestra la necesidad del uso de modelos de transferencia radiativa que trabajen en el infrarrojo térmico para poder tener en cuenta las distintas componentes del píxel agregado. Adicionalmente, estas relaciones entre píxel y copa pura podrían ser usadas para evaluar los niveles de estrés hídrico en cultivos abiertos, estimando la temperatura de la vegetación pura, y con esto un valor realista de la diferencia Тс-Та.

Bibliografía

Agencia para el aceite de oliva. AAO, 2008 (http://aao.mapa.es)

Acevedo, E., Fereres, E., Hsiao, T. y Henderson, D. (1979). Diurnal Growth Trends, Water Potential, and Osmotic Adjustement of Maize and Sorghum Leaves in the Field. *Plant Physiology*, 64, 476-480.

Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A. y Trezza, R. (2005). A Landsat based energy balance and evapotranspiration model in western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 251–268.

Annan, K., 2000. UN Millennium Summit. http://www.un.org/millennium/

Bausch, W.C. y Neale, C.M.U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions of the ASAE*, 30(3), 703–709.

Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., y Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212 (1-4), 198–212.

Becker, F., y Li, Z. (1990). Towards a local split-window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 369-393.

Berger, X. (1988). A simple model for computing the spectral radiance of clear Skies. *Solar Energy*, 40(4), 321-333.

Berk, A., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Chetwynd, J. H., Bernstein, L. S., Shettle, E. P., Matthew, M. W., y Adler-Golden, S. M. (1999). *MODTRAN4 user's manual*, Air Force Research Laboratory, Hanscom AFB, MA.

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.

Berstein L. S. y Roberston D.C. (1989). MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7. Geophys. Lab, Bedford, MA ,Technical Report GL-TR-89-0122.

Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F. J., y Fereres, E., (1999). Measurement and simulation of evaporation from soil olive orchards. *Irrigation Science*, 18, 205-211.

Boyer, J.S. 1976. Water deficits and photosynthesis. In: Water Deficit and Plant Growth. (Ed. T.T. Kozlowski). Vol.IV. Academic Press.

Brutsaert, W. (1975). On a derivable formula for long wave radiation from clear skies. *Water Resour. Res.*, 11, 742-744.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., y Williams, D. (1983). Forest Fire Behaviour Effects. Fire in Forestry, vol I. NewYork: Wiley.

Chander, G. y Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674-2677.

Clawson, K.L. y Blad, B.L. (1982), Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal* 74, 311-316.

Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y. y Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.

Cowan, I.R. (1965).Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of Applied Ecology*, 2, 221-39.

Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., y Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2563-2594.

Deschamps, P. Y. y Phulpin , T. (1980). Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μ m. *Boundary Layer Meteorology*, 18, 131-143.

FAOSTATS, 2008 (http://faostat.fao.org)

Fereres, E., y Soriano, A. (2007). Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.

Fereres, E., Golhamer, D.A. y Parsons, L.R. (2003). Irrigation Water Management of Horticultural Crops. Historical Review Compiled for the American Society of Horticultural Science's 100th Anniversary. *Horticultural Science*, 38(5), 1036-1042.

François, C., C. Ottlé, y L. Prévot (1997). Analytical parametrisation of canopy emissivity and directional radiance in the thermal infrared: Application on the

retrieval of soil and foliage temepratures using two directional measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2587-2621.

Gastellu-Etchegorry, J.P. y Bruniquel-Pinel, V. (2001). A modeling approach to assess robustness of spectrometric predictive equations for canopy chemistry. *Remote Sensing of the Environment*, 76, 1-15.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., y Zagolsky, F. (1996). Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58, 131-156.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Guillevic, P., Zagolski, F., Demarez, V., Trichon, V., Deering, D., y Leroy, M. (1999) Modeling BRF and radiation regime of tropical and boreal forests, Part I: BRF. *Remote Sensing of Environment*, 68, 281–316.

Gillespie, A. R. (1985). Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS, *The TIMS Data User's Workshop*, JPL Pub. 86-38, pp. 29-44.

Gillespie, A. R., Rokugawa, 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.

Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Alegre, S., Rufat, J., y Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 432-440.

Guillevic, P., Gastellu-Etchegorry, J. P., Demarty, J. y Prévot, L. (2003) Thermal infrared radiative transfer within three-dimensional vegetation covers. *Journal of Geophyical. Research*, 108(D8), 4248, doi:10.1029/2002JD002247.

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J. y Strachan, I. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of

crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337–352.

Hidalgo, F.J. y Zamora, R. (2003). Edible oil analysis by high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy: recent advances and future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 499-506.

Hsiao, T.C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24, 519-570.

Huete, A.R. (1988). A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.

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.

Idso, S. B. (1982) Non-Water-Stressed Baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27, 59-70.

Ines, A. y Honda, K. (2005).On quantifying agricultural and water management practices from low spatial resolution RS data using genetic algorithms: A numerical study for mixed-pixel environment. *Advances in Water Resources*, 28(8), 856-870

Jackson, R.D., y Pinter, P.J., Jr. (1981). Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation, in *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, France, pp. 399-406

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 Ehrler, W.L. (1977b). Crop temperature reveals stress. *Crop Soils*, 29, 10-13.

Jackson, R. D, Idso, S. B. Reginato, y R. J. Pinter, JR. (1981) .Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*, 4(17), 1133-1138.

Jacob, F., Petitcolin, F., Schmugge, T., Vermote, E., French, A., y Ogawa K. (2004). Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors. *Remote Sensing of Environment*, 90, 137-152.

Jiménez-Muñoz, J.C. y Sobrino , J.A. (2003) . A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 18, 4688.

Jones, H.G. (1999), Use of the infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 139-149.

Junta de Andalucía. (2005). Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y Orografía. DVD. I.S.B.N.: 84-96329-34-8.

Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P., Nerry, F., y Ottlé, C. (2004). Land surface temperature retrieval techniques and applications: case of AVHRR, *Thermal Remote Sensing in* D. A. Quattrochi & J. C. Luvall (eds), *Land Surface Processes* (pp. 33-109). CRC Press, Florida, USA.

Kimes, D. S. (1980). Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperature. *Remote Sensing of Environment*, 10, 165-174.

Kimes, D. S., S. B. Idso, P. J. Pinter, R. D. Jackson, y R. J. Reginato (1980). Complexities of nadir-looking radiometric temperature measurements of plant canopies. *Applied Optics*, 19, 2162-2168.

Kramer, P.J. y Boyer, J.S. (1995). Water relations of plants and soils. Academic Press. San Diego, CA, USA.

Luquet, D., J. Dauzat, A. Vidal, P. Clouvel, y A. Bégué (2001). 3D simulation of leaves temperature in a cotton-row crop: toward an improvement of thermal infrared signal interpretation to monitor crop water status, *8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing* (ISPRS, ed.), Aussois, France, pp. 493-499.

Luquet, D. (2002). Suivi de l'état hydrique des plante par infrarouge thermique: Analyze expérimentale et modélisation 3D de la variabilité thermique au sein d'une culture en rang de cotomier, Tesis Doctoral, Institut National Agronomique Paris Grignon, París, Francia, 164 pp.

Leinonen, I. y Jones, H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for stimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1423-1431.

McClain, E. P., Pichel, W.G. y Walton, C. C. (1985). Comparative performance of AVHRR-Based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90, 11587-11601.

McMillin, L.M. (1975). Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80, 5113-5117.

Mitchell, P.D. y Chalmers, D.J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 107, 853-856.

McGuire, M. J., L. K. Balick, J. A. Smith, y B. A. Hutchison (1989). Modeling directional radiance from a forest canopy. *Remote Sensing of Environment*, 27, 169-186.

Mo X., Liu S., Lin Z. , Xu Y., Xiang Y., y McVicar T.R. (2005) Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*, 183, 301–322

Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., y Cohen, S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 827-838.

Moriana A., Orgaz, F., Pastor, M. y Fereres, E. (2003). Yield Responses of a Mature Olive Orchard to Water Deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425-431.

Olioso, A. (1995). Simulating the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 3211-3216.

Olioso, A., H. Chauki, D. Courault, y J.-P. Wigneron (1999). Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sensing of Environment*, 68, 341-356.

Pinter, P.J., Jackson, R.D. y Moran, M.S. (1990). Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: a comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 32, 215–228.

Prata, A. J. (1993). Land surface temperatures derived from the AVHRR and ATSR, 1, Theory. *Journal of Geophysical Research*, 89(16), 689-702.

Prata, A. J. (1994). Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 99, 13025-13058.

Prévot, L. (1985). *Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux – Application à la télédétection – Validation sur un couvert de mäs*, Tesis Doctoral, Universidad de París VI, 135 pp.
Price, J.C. (1984). Land surface measurements from the split window channels of the NOAA 7 AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 2367-2393.

Qin, Z., Karnieli, A., y Berliner, P. (2001). A monowindow algorithm for retrieving land surface temperature from Lansat TM data and its aplication to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719-3746.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y., y Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126.

Ray, S.S. y Dadhwal V.K. (2001). Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. *Agricultural Water Management*, 49, 239–249.

Reicosky, D.C., Smith, R.C.G. y Meyer, W.S. 1985. Foliage temperature as means of detecting stress of cotton subjected to a short-term water-table gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35, 193-203.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., y Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD, 1–371.

Rondeaux, G., Steven, M., y Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 59-107.

Robinson, P.J. y Davies, J.A. (1972): Laboratory determinations of water surface emissivity. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 1391-1393.

Slatyer, J. O. (1967). Plant-water relationships. New York: Academic press.

Smith, J. A., K. J. Ranson, D. Nguyen, L. Balick, L. E. Link, L. Fritschen, y B. Hutchison (1981). Thermal vegetation canopy model studies. *Remote Sensing of Environment*, 11, 311-326.

Sepulcre-Cantó, G., Zarco-Tejada, P.J., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., de Miguel, E., y Villalobos, F.J., (2006). Within-field thermal variability detection as function of water stress in Olea europaea L. orchards with high spatial remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31-44.

Serrano, L., Ustin, S.L., Roberts, D.A., Gamon, G.A., y Penuelas, J. (2000). Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 74, 570-581.

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, BB., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olsen, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D. Scheankl, L., Sibbert, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., y Yeager, J. (1997). Plant waterstatus as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* 7, 23–29.

Slatyer, J. O. (1967). Plant-Water Relationships. New York and London: Academic press. 366p.

Sobrino. J.A., Coll, C., y Caselles, V. (1991). Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR Channels 4 and 5. Remote Sensing of Environment, 38:19-34.

Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., El-Kharraz J., Gómez M., Romaguera M., ySòria G. (2004), Single-channel and two channel methods for land surface temperatura retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *Int. J. of Rem. Sens.* 25, 215-230.

Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G. y de Miguel, E. (2006). Land surface tempearture derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 102, 99-115.

Sobrino, J. A., Li, Z. L., Soria, G., y Jiménez, J. C. (2002). Land surface temperature and emissivity retrieval from remote sensing data. *Recent Research Developments on Geophysics*, 4, 21–44.

Sobrino, J. A, Li, ZL. y Stoll, M. P. (1993). Impact of the atmospheric transmittance and total water vapour content in the algorithms for stimating sea surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 946-952.

Sobrino, J. A, Li, ZL., Stoll, M. P. y Becker, F.(1994). Improvements in the *split-window* technique for land surface temperature determination. *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, 32, 243-253.

Sobrino, J. A, Li, ZL., Stoll, M. P. y Becker, F.(1996). Multi-channel and multiangle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2089-2114.

Sobrino, J. A., Sòria, G. y Prata, A. J. (2004). Surface temperature retrieval from Along Track Scanning Radiometer 2 data: Algorithms and validation. *Journal of Geophysical Research*, 109, D11101, doi: 10.1029/2003JD004212.

Stimson, H., Breshears, D., Ustin S. y Kefauver, S. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occuring conifer species: *Pinus edulis* and *Junisperus monosperma. Remote Sensing of Environment*, 96, 108-118.

Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C.y Sobrino, J. (2007) Assessing Canopy PRI for Water Stress detection with Diurnal Airborne Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112, 560-575.

Tanner, C. B. (1963). Plant temperatures. Agronomy Journal, 55, 210-211.

Tasumi, M. y Allen, R. G. (2007). Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 54-62.

Testi, L. (2003). Medida y modelización de la evaporación de Plantaciones de Olivo (*Olea europaea L.*). PhD Thesis Universidad de Cordoba, Spain.

<u>Tubaileh</u>, A.S., Sammis, T.W. y Lugg, D.G., (1986). Utilization of thermal infrared thermometry for detection of water stress in spring barley. *Agricultural Water Management*, 12, 75–85.

Turner NC (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil*, 58, 339

Turner, L. B., (1990). The Extent and Pattern of Osmotic Adjustment in White Clover (*Trifolium repens* L.) During the Development of Water Stress. *Annals of Botany*, 66, 721-727

Tou, J. T. y Gonzalez, R. C. 1974. Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

Uriu, K.y Magness, J.R. (1967). Deciduous tree fruits and nuts. In: Hagan RM, Haise HR,Edminster TW (Eds) *Irrigation of Agricultural Lands*, Monograph 11, American Society of Agronomy, Madison, WI.

USDA, Soil Conservation Service. 1975. USDA Soil Conservation Service, Soil Taxonomy: A Basic System for Making and Interpreting Soil Surveys. In: *Handbook 436*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

Ustin, S.L., Roberts, D.A., Pinzon, J., Jacquemoud, S., Gardner, M., Scheer, G., Castaneda, C.M. y Palacios, A. (1998). Estimating Canopy Water Content of Chaparral Shrubs Using Optical Methods. *Remote Sensing of Environment*, 65, 280-291.

Villalobos F.J., Mateos L., Orgaz F., Fereres E. 2002. Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, pp. 157-180

Wang, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P. y Miller, D.R. (2007). Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agricultural Water Management*, 88, 253–263.

Wanjura D.F., Maas S.C., Winslow, D.R. y Upchurch D.R. (2004). Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 33-48.

Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., y Pniel, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1062-1071.

Zarco-Tejada, P.J., J.R. Miller, A. Morales, A. Berjón, y J. Agüera, (2004). Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 463-476

Zarco-Tejada, P.J., Whiting, M., y Ustin, S.L. (2005). Temporal and Spatial Relationships between within-field Yield variability in Cotton and High-Spatial Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641-653.

Anexo I

Anexo I



Available online at www.sciencedirect.com SCIENCE dDIRECT.

AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY

www.elsevier.com/locate/agrformet

Agricultural and Forest Meteorology 136 (2006) 31-44

Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery

G. Sepulcre-Cantó^a, P.J. Zarco-Tejada^{a,*}, J.C. Jiménez-Muñoz^b, J.A. Sobrino^b, E. de Miguel^c, F.J. Villalobos^{a,d}

^a Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Alameda del Obispo, s/n, 14004 Córdoba, Spain ^b Universidad de Valencia, Valencia, Spain ^c Laboratorio de Teledetección, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Madrid, Spain ^d Dpto, de Agronomía, Universidad de Córdoba, Spain Received 12 May 2005; received in revised form 3 January 2006; accepted 16 January 2006

Abstract

An investigation of the detection of water stress in non-homogeneous crop canopies such as orchards using high-spatial resolution remote sensing thermal imagery is presented. An airborne campaign was conducted with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) acquiring imagery in 38 spectral bands in the 0.43–12.5 μ m spectral range at 2.5 m spatial resolution. The AHS sensor was flown at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT in 25 July 2004 over an olive orchard with three different water-deficit irrigation treatments to study the spatial and diurnal variability of temperature as a function of water stress. A total of 10 AHS bands located within the thermal-infrared region were assessed for the retrieval of the land surface temperature using the *split-window* algorithm, separating pure crowns from shadows and sunlit soil pixels using the reflectance bands. Ground truth validation was conducted with infrared thermal sensors placed on top of the trees for continuous thermal data acquisition. Crown temperature (T_c – T_a), and relative temperature difference to well-irrigated trees (T_c – T_R , where T_R is the mean temperature of the well-irrigated trees) were calculated from the ground sensors and from the AHS imagery at the crown spatial resolution. Correlation coefficients for T_c – T_R between ground IRT sensors and airborne image-based AHS estimations were R^2 = 0.50 (7:30 GMT), R^2 = 0.45 (9:30 GMT) and R^2 = 0.57 (12:30 GMT). Relationships between leaf water potential and crown T_c – T_a measured with the airborne sensor obtained determination coefficients of R^2 = 0.62 (7:30 GMT). R^2 = 0.35 (9:30 GMT) and R^2 = 0.25 (12:30 GMT). Images of T_c – T_a and T_c – T_R for the entire field were obtained at the three times during the day of the overflight, showing the spatial and temporal distribution of the thermal variability as a function of the water deficit irrigation schemes.

Keywords: Thermal remote sensing; Crown temperature; Water stress; Deficit irrigation; Split-window

1. Introduction

The estimated *Olea europaea* L. (olive trees) cultivated area in Spain is about 2,400,000 ha (AAO,

- * Corresponding author. Tel.: +34 957 499 280/676 954 937; fax: +34 957 499 252.
- E-mail address: pzarco@ias.csic.es (P.J. Zarco-Tejada).

URL: http://www.ias.csic.es/pzarco

0168-1923/\$ – see front matter C 2006 Elsevier B.V. All rights reserved. doi:10.1016/j.agrformet.2006.01.008

2001), with more than 200 million of olive trees. General trends for water supply limitations in Mediterranean countries make essential to understand the olive tree water relations (Orgaz and Fereres, 2004), as well as to develop measurement methods for olive tree water status and stress detection in large areas.

Canopy temperature has been suggested as a water stress indicator in several studies (Jackson et al., 1977b;

Idso et al., 1978; Jackson and Pinter, 1981), Tanner in 1963 used thermal-infrared sensors to determine the canopy temperature in potatoes, observing that temperature was a potentially reliable parameter to determine the crop water status. Other studies compared the measured canopy temperature to that of a wellwatered reference plot as an indicator of water stress (Fuchs and Tanner, 1966; Clawson and Blad, 1982; Berliner et al., 1984), obtaining the relative thermal difference between well-irrigated and stressed plants. Jackson et al. (1977a) used canopy temperature (T_c) minus air temperature (T_s) as an index to study the water status of the crops, relating $T_c - T_a$ to productivity and crop water requirements. It was suggested that environmental factors like vapour pressure deficit (VPD), net radiation and wind speed could influence the canopy temperature differences. Further studies demonstrated a linear relationship between VPD and $T_{\rm c} - T_{\rm a}$, obtaining the crop water stress index (CWSI), which incorporated the VPD variations (Idso et al., 1981: Jackson et al., 1981). The relationship found between $T_c - T_a$ and VPD (Idso, 1982) suggested that environmental variability was an important factor, demonstrating that high values of $T_c - T_a$ were associated with water stressed plants, while low values were associated with well-irrigated plots. Moran et al. (1994) further developed the Water Deficit Index (WDI) based on $T_c - T_a$ and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to estimate the relative water status. Among other studies, these methods were then continued using infrared thermometers for stomatal conductance estimation under controlled irrigation (Jones, 1999) and using canopy temperature to estimate crop transpiration indices (Jones et al., 2002). These methods, focused on canopy temperature for monitoring stomatal conductance, are based on the effects of water stress on stomatal closure and thermal energy dissipation pathways.

Infrared technology has improved as a result of the development of light sensors with improved field of views (FOV), capable of providing greater spectral information (Wanjura et al., 2004), and enabling the monitoring of vegetation surface temperature on different spatial and temporal scales. Different sensors are currently available for the monitoring of vegetation temperature at different scales, both at airborne and satellite scales, such as the Airborne Thematic Mapper (ATM), Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS), Airborne Hyperspectral Scanner (AHS), Landsat Thematic Mapper (TM), Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), among others. Nevertheless, spatial and spectral characteristics of current thermal sensors onboard satellite platforms readily prevent the application of thermal detection methods for vegetation monitoring in non-homogeneous canopies, where shadow and soil background effects play an important role. Some recent studies on surface temperature estimation with high spatial resolution remote sensing imagery have proved that this technology is available for obtaining accurate measurement of surface temperature. As an example, Sobrino et al. (2004a,b) made a quality analysis of DAIS imagery comparing it with in situ surface temperature. Results showed deviations lower than 1.5 K when a vicarious calibration was conducted. It is generally accepted that the atmospheric correction and the estimation of the surface emissivity are the most important difficulties for remote sensing estimation of surface temperature Norman et al. (1995).

Various algorithms have been developed to retrieve land surface temperature from at-sensor and auxiliary data, such as the single-channel methods (Qin et al., 2001), split-window technique (Price, 1984; Becker and Li, 1990; Sobrino et al., 1991, 1994; Prata, 1993) and multi-angle methods (Prata, 1993, 1994; Sobrino et al., 1996, 2004a,b). Jiménez-Muñoz and Sobrino (2003) proposed a generalized single-channel algorithm that can be applied to different sensors onboard a satellite obtaining root mean square deviations lower than 2 K for AVHRR and ATSR-2 channel, and lower than 1.5 K for Landsat Thematic Mapper (TM). Recent studies comparing surface emissivity and radiometric temperature retrievals from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and ASTER sensors showed good agreements, with differences lower than 0.9 K (Jacob et al., 2004). These results show high potential for remote sensing estimates of canopy temperature with medium-resolution sensors, ranging from 90 m (ASTER) to 1000 m (MODIS) pixel size. Nevertheless, there has been very limited indication in the literature showing feasible remote sensing methods for successfully linking thermal detection of vegetation and water stress in non-homogeneous tree crop canopies such as orchards. This is probably due to the requirements for using very high spatial resolution imagery (1-2 m pixel size) that enables targeting individual tree crowns and the successful separation of scene components, such as pure vegetation, soil background and shadow effects.

This study presents progress made on the application of high-spatial resolution and hyperspectral visible and near-infrared and multispectral thermal imagery,

174

collected with the Airborne Hyperspectral Scanner, to obtain spatial and temporal variability in canopy temperature for an olive orchard under different irrigation treatments.

2. Materials and methods

2.1. Study site selection and experimental design

Research work was conducted from June to November 2004 in a 4 ha irrigated olive orchard (*Olea europaea* L. cv. 'Arbequino') located in Córdoba, southem Spain ($37^{\circ}48'N$, $4^{\circ}48'W$). The climate of the area is Mediterranean with an average annual rainfall of 650 mm, concentrated from autumn to spring, and reference evapotranspiration of 1390 mm. The soils in the study area are classified as *Typic Xerofluvents* corresponding to sandy slimy soil from alluvium, with a sandy stratum at 1.5 m depth. The soil has 0.23 m³ m⁻³ high water content limit and a 0.07 m³ m⁻³ low water content limit (Testi, 2003).

The olive trees were planted in 1997 in a 3.5 m × 7.0 m pattern (408 trees ha⁻¹) with the longer dimension in the E–W direction. The olive trees were planted on ridges to avoid flooding problems. The soil was kept under no tillage using herbicides. Fig. 1 shows the study site area and the orchard field imaged by the AHS airborne sensor used in this study and described later. Three drip irrigation treatments were randomly applied within an area of six rows of 18 olive trees (2646 m²): (i) irrigating 2.8 mm/day (well-irrigated treatment, R); (ii) 0.7 mm/day (deficit treatment, S1); and (iii) an intermittent treatment, with 1.2 mm/day from 14 June 2004 to 5 July 2004 and from 6 September 2004 to 19 October 2004, stopping irrigation from 5 July to 6 September (deficit treatment, S2) (Fig. 2).

2.2. Field data collection

A Scholander pressure bomb (PWSC Model 3000, Soilmoisture equipment Corp., CA, USA) was used to measure leaf water potential from 11 trees covering the three irrigation treatments, measuring weekly at 10:00 Greenwich Mean Time (GMT), which is close to solar time at the longitude of our experimental site. Stomatal conductance was measured weekly every hour from 6:30 to 10:30 GMT from three trees with a leaf steadystate porometer (model PMR-4, PP Systems, Hitchin Herts, Great Britain). Leaf photosynthesis was measured weekly at 6:30, 7:30 and 10:00 GMT from six trees with a CIRAS-1 instrument (PP Systems, Hitchin Herts, Great Britain).





Fig. 1. (a) Image acquired on 25 July 2004 with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) sensor at 2.5 m spatial resolution, the olive grove used in this study is shown with a yellow border. (b) A close up of the olive grove. The subzone where the irrigation treatments were applied is shown with an orange border.

A total of 10 single-band infrared sensors covering the 6.5–14 µm range (model IRTS-P, Apogee, UT, USA) were placed over 10 trees comprising the three irrigation treatments in order to continuously monitor crown temperature. Previous to the field installation, the IRT sensors were calibrated in the laboratory and under natural sun conditions to characterize the IRT response to the diurnal temperature variation. Temperature over the course of the day varied between 25 and 40 °C, enabling a comparison between the IRTestimated temperature and a thermocouple type K (chromel–alumel) in contact with the water target used for calibration. The observed errors agreed within the accuracy of the instrument (Apogee, www.apogee-inst.com) yielding a deviation of ± 0.4 °C over the range of 5–40 °C range. The 52°



Fig. 2. An image acquired on 25 July 2004 showing the olive tree blocks under the different irrigation levels. S1 and S2 are the two deficit irrigation treatments, and R is the well-irrigated treatment. The rest of the olive orchard was drip irrigated with treatments selected in the framework of other experiments.

field of view of the IRTS-P mounted 1 m above the tree crown ensured that 85% of the signal came from the tree enabling a measurement of an integrated canopy temperature for each single tree crown (Fig. 3). A total of 300 measurements (1 s⁻¹) were used to record the mean temperature at 5-min intervals in three dataloggers (model CR10X, Campbell Sci., UT, USA) placed in the study site. In addition, a field thermal radiometer Raytek (model Raynger II, Raytek, CA, USA) with a single broadband sensor covering the range 8–14 μ m was used to measure temperatures over a water body. These measurements were employed to check the values retrieved from the airborne sensor data. Air temperature (T_a) data were also measured in the field at each time of image acquisition with a Vaisala



Fig. 3. Schematic view of the infrared thermal sensor installation.

Weather Transmitter (model WXT510, Vaisala Oyj, Helsinki, Finland) installed in the study plot at 1 m over a control tree (6 m above ground).

2.3. Airborne campaign with the AHS sensor

The airborne campaign was conducted by the Spanish Aerospace Institute (INTA) with the Airborne Hyperspectral Scanner (developed by Sensytech Inc., currently Argon St. Inc., USA). The AHS sensor acquired imagery in 38 spectral bands in the 0.43–12.5 μ m spectral range, with 90° FOV and 2.5 mrad instantaneous field of view (IFOV). The aircraft flew at 1000 m altitude above ground level (AGL), obtaining imagery at 2.5 m spatial resolution (Fig. 1). Out of the total of 10 AHS bands located within the thermal-infrared region, bands 75 (10.069 μ m) and 79 (12.347 μ m) were used to retrieve the land surface temperature for every pixel using the split-window algorithm. Spectral bands located in the visible (10 bands between 0.43 and 0.73 µm, with 0.03 um bandwidth) and near-infrared region (10 bands between 0.73 and 1.65 µm, with 0.03 µm bandwidth) were used for pure olive-crown pixel identification and separation from soil, background targets and shadows. The airborne campaign consisted on three flights scheduled at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT (9:30, 11:30 and 14:30 local time) on 25 July 2004, therefore enabling the study of both the diurnal and spatial variation of individual tree temperature as function of the three irrigation treatments.

2.4. Land surface temperature retrieval from AHS data: two-channel technique

Methods for land surface temperature (LST) retrieval from thermal remote sensing data are based on the radiative transfer equation applied to the thermalinfrared region (Eq. (1)).

$$L(\theta)_{\text{sensor},i} = (\theta)_{\text{surface},i} \tau(\theta)_i + L(\theta)_{\text{atm},i}^{\dagger}$$
(1)

where θ is the observation angle, τ_i the channel total transmissivity of the atmosphere in channel *i*, $L_{\text{atm},i}^{\dagger}$ the upwelling atmospheric radiance in channel *i* and $L_{\text{surface},i}$ is the channel radiance observed in channel *i* at ground level (Eq. (2)).

$$L(\theta)_{\text{surface},i} = \varepsilon(\theta)_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon(\theta)_i) L(\theta)_{\text{atm},i}^{\downarrow}$$
(2)

In this equation, ε_i is the channel emissivity, $L_{\text{atm},i}^{\downarrow}$ the downwelling hemispheric atmospheric radiance in

176

channel *i* and $B_i(T_s)$ is the channel radiance which would be measured if the surface were a blackbody ($\varepsilon = 1$) at temperature T_s , defined by the Planck law (Eq. (3)).

$$B_i(T_s) = \frac{C_1}{\lambda_i^5 \left[\exp\left(\frac{C_i}{\lambda_i T_s}\right) - 1 \right]}$$
(3)

with $C_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $C_2 = 14387.7 \ \mu\text{m} \text{ K}$ and λ_i the effective wavelength (in μ m) defined as in Eq. (4):

$$\lambda_i = \frac{\int_0^\infty \lambda f_i(\lambda) \, d\lambda}{\int_0^\infty f_i(\lambda) \, d\lambda} \tag{4}$$

in which $f_i(\lambda)$ is the spectral response of the sensor in channel *i*.

A resume of methods for LST retrieval may be found in Sobrino et al. (2002, 2004a,b), Dash et al. (2002) and Kerr et al. (2004), among others. In this paper the twochannel technique (also called split-window when applied in the region 10–12.5 μ m) was used. The basis of this method is that the atmospheric attenuation of the surface emitted radiance is proportional to the difference between the at-sensor radiances measured simultaneously in two different thermal channels (McMillin, 1975). Many papers have used this technique to extract sea surface temperature (Deschamps and Phulpin, 1980; McClain et al., 1985; Sobrino et al., 1993) and land surface temperature (Price, 1984; Becker and Li, 1990; Sobrino et al., 1991, 1994; Prata, 1993). In this study, the two-channel algorithm proposed by Sobrino and Raissouni (2000) and given in Eq. (5) has been used, which takes into account the emissivity and water vapour effects.

$$T_{s} = T_{i} + a_{1}(T_{i} - T_{j}) + a_{2}(T_{i} - T_{j})^{2} + a_{0}$$
$$+ (a_{3} + a_{4}W)(1 - \varepsilon) + (a_{5} + a_{6}W)\Delta\varepsilon$$
(5)

where T_s is the surface temperature (in K), T_i and T_j the *at-sensor* brightness temperatures (K) of the thermal bands *i* and *j*, $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$ and $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ the mean effective emissivity and the emissivity difference, *W* the total atmospheric water vapour (g/cm²) and a_k (k = 0, ..., 6) are the numerical coefficients of the *two-channel* algorithm. The procedure used in order to obtain these coefficients and the results obtained with the *two-channel* algorithm are shown in Section 3.2.

3. Results and discussion

3.1. Field measurements of crown temperature and water potential

35

The leaf water potential responded to the water stress effects resulting from the different irrigation treatments. The leaf water potential oscillated between -0.6 and -3.3 MPa, with the lowest values corresponding to the trees under deficit irrigation treatments. Fig. 4 shows the weekly leaf water potential measurements of individual trees and the average for each irrigation treatment. Higher leaf water potential variations over the summer corresponded to trees under the greatest deficit irrigation treatment (treatment S1), with S2 (intermediate) and R (well-irrigated, Control) treatments showing differences greater than -2 MPa. The largest differences were obtained at the beginning of October, just before the onset of autumn rainfalls which caused the recovery of deficit treatments. Control trees (R) showed the leaf water potentials above -1 MPa during all the experiment. The stomatal conductance was affected due to the water stress, showing smaller values for the deficit irrigation treatments (S1 and S2). Stomatal conductance measured at 11:00 GMT varied through the experiment as a function of stress status, shifting from 8 mm s⁻¹ at the time of maximum stress to 17 mm s⁻¹ at recovery for treatment R, from 5 to 14 mm s⁻¹ for treatment S2, and from 2 to 13 mm s⁻¹ for treatment S1. The photosynthesis rate measured at 10:00 GMT showed consistently a reduction for treatment S1, throughout the experiment, yielding 10.35 µmol/m² s for well-irrigated trees and 6.5 µmol/m² s for stressed treatment S1 at the time of maximum stress (27 September 2004).

The thermal-infrared canopy temperature averaged per treatment (T_c) (Fig. 5) showed consistently that stressed trees (S1 and S2) presented higher crown temperature than well-irrigated trees (R). There were not large canopy temperature differences between treatments for either early morning and before sunrise. During midday the largest differences between treatments S1 and R for the day of the overflight (25 July 2004) were 2 K between 13:00 and 15:00 GMT (Fig. 5a and b). Larger differences were found later in the season, close to the end of the experiment, going up to 4 K temperature difference between stressed and wellirrigated olive trees (Fig. 5c and d for 23 September 2004).

Results obtained for $T_c - T_a$ for each measured tree, and for each water stress treatment for the day of the overflight (25 July 2004) are shown in Fig. 6, yielding





Fig. 4. (a) Weekly leaf water potential for individual trees collected between July and November 2004 and (b) averaged per treatment. S1 treatment (triangles), S2 (squares) and R (circles).

 $T_{\rm c} - T_{\rm a}$ for the trees under treatment S1 up to 4 K at 12:00 GMT.

3.2. Airborne thermal imagery results

In order to retrieve the LST from AHS imagery using the *two-channel* algorithm given in Eq. (5), the numerical values for the coefficients a_k must be obtained using a simulation procedure and a total of 60 atmospheric profiles (the method is described in detail in Sobrino et al., 2004a,b). In this study, the radiative transfer code MODTRAN 4 and a total of 299 emissivity spectra extracted from the ASTER spectral library (http://speclib.jpl.nasa.gov) were used in the simulation procedure, versus the MODTRAN 3.5 and the eight emissivity spectra used in Sobrino et al. (2004a,b). The atmospheric region between the surface and the sensor altitude was also modified in this study, using the 1 km flight altitude of the AHS sensor and four layers in the MODTRAN code.



Fig. 5. (a) Diurnal canopy infrared temperature obtained per treatment on 25 July 2004, showing the data for the time period of maximum thermal differences (b). (c) Diurnal canopy infrared temperature obtained per treatment on 23 September 2004, showing the data for the time period of maximum thermal differences (d).

178

Table 1



Fig. 6. (a) Diurnal infrared thermal sensor $T_c - T_a$ data (canopy temperature minus air temperature) obtained on 25 July 2004 per irrigation treatment: S1 treatment (red); S2 (green); R (blue); and (b) for individual trees.

Table 1 shows the error obtained in the sensitivity analysis for different AHS bands combinations, with bands combinations providing the worst results not shown. The sensitivity analysis has been performed following the procedure describe in Sobrino et al. (2004a,b). The results indicated that the combination between AHS band 75 (10.069 μ m) and band 79 (12.347 μ m) was the best choice for the LST retrieval from AHS imagery using the *split-window* algorithm, obtaining an error of 1.1 K from simulation data.

Error in the land surface temperature retrieved with a two-channel algorithm (see Eq. (5)) for different Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) band combinations

Band i	Band j	Error (K)
75 (10.07 µm)	76 (10.59 µm)	1.3
75 (10.07 µm)	77 (11.18 µm)	1.2
75 (10.07 µm)	78 (11.78 µm)	1.2
75 (10.07 µm)	79 (12.35 µm)	1.1
76 (10.59 µm)	77 (11.18 µm)	2.2
76 (10.59 µm)	78 (11.78 µm)	1.7
76 (10.59 µm)	79 (12.35 µm)	1.4
77 (11.18 µm)	78 (11.78 µm)	2.4
77 (11.18 µm)	79 (12.35 µm)	1.7
78 (11.78 µm)	79 (12.35 µm)	2.4

AHS bands 71, 72, 73, 74 and 80 not included.

Eq. (6) shows the *two-channel* algorithm with the numerical coefficients for the combination 75–79.

$$T_{s} = T_{75} + 0.4850(T_{75} - T_{79}) + 0.0068(T_{75} - T_{79})^{2} + 0.0798 + (47.15 - 10.80W)(1 - \varepsilon) + (-49.05 + 21.53W)\Delta\varepsilon$$
(6)

The proposed algorithm was checked using LST values measured in situ simultaneously with the AHS flights over a water body using the field radiometer Raytek–Raynger II. Water surfaces are of great interest for validation purposes, since they are homogeneous and almost blackbodies. LST values were obtained according to Eq. (2) and by inversion of the Planck's law (Eq. (3)) using a centre wavelength of 11 µm. Downwelling atmospheric radiance was measured in the field by pointing to the sky with the radiometer, choosing a nean value for the water emissivity of 0.985. In order to apply the *split-window* algorithm given in Eq. (6), an increment in emissivity $\Delta z = 0$ was chosen, using a value for the water vapour W = 0.9 g/cm². Water vapour was obtained by scaling to an altitude of 1 km the measured value in the 'El Arenosillo' site, part of the

Table 2

Comparison between the land surface temperature extracted from the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) images using the *split-window* algorithm given in Eq. (6) and the values measured in situ over a water body with the field radiometer Raytek–Raynger II

Flight (GMT)	Measured (K)	AHS (K)	AHS – measure (K)
7:30	304.8	304.2	-0.6
9:30	307.8	306.1	-1.7
12:30	308.1	307	-1.1

Bias = -1.1 K; $\sigma = 0.6$ K; RMSE = 1.3 K.

AERONET network (http://aeronet.gsfc.nasa.gov). Although this site is around 250 km away from the field site, the value was acceptable because the terms related to *W* in Eq. (6) are almost negligible due to the assumed high emissivity. The results obtained are shown in Table 2, with a root mean square error (RMSE) of 1.3 K. Although only three values were considered in this analysis, one per flight, results indicate that the algorithm provided good results. In order to demonstrate that high-spatial thermal remote sensing imagery can be used to monitor diurnal thermal changes as a function of water stress conditions, three spatial levels of study were used for retrieving the plot and tree temperature from the three AHS images: (i) estimating the temperature from homogeneous treatment plots comprising 12 trees across three crop lines under the same irrigation level (Fig. 7a and d); (ii) from smaller treatment blocks comprising four contiguous trees on the



Fig. 7. Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) images showing the blocks used for the levels of study: (a) 12 trees across three crop lines under the same irrigation level; (b) smaller treatment blocks comprising four contiguous trees along the same row; and (c) individual trees. (d-f) The thresholds applied to the imagery that enabled the identification of pure crown pixels for each level of study. The grey levels used to show the blocks under different irrigation treatments were randomly selected.

180

		Measured – AHS	AHS	Measured	Tree	Flight (GMT)
		(K)	(K)	(K)		
= 0.3 K; RMSE = 1.9 K	Bias = -1.9 K;	-2.5	305.4	302.9	9-36(S2)	7:30
		-1.6	304.8	303.2	9-37(S2)	
		-1.9	304.6	302.7	9-40(S1)	
		-2.2	304.8	302.6	9-41(S1)	
		-1.5	304.2	302.6	12-37(R)	
		-1.5	304.7	303.2	12-33(S1)	
		-2.1	304.6	302.5	12-36(R)	
		-1.9	304.1	302.2	12-44(R)	
		-1.8	304.2	302.5	12-40(S2)	
		-1.8	303.9	302.1	12-41(S2)	
= 1.1 K; RMSE = 1.7 F	Bias = -1.3 K;	-1.3	311.6	310.3	9-36(S2)	9:30
		-0.9	311.7	310.8	9-37(S2)	
		-1.6	311.1	309.5	9-40(S1)	
		-1.3	310.7	309.4	9-41(S1)	
		-0.2	310.1	309.8	12-37(R)	
		-0.5	310.8	310.3	12-33(S1)	
		-1.2	310.2	309.0	12-36(R)	
		-2.3	310.4	308.1	12-44(R)	
		-1.6	310.7	309.0	12-40(S2)	
		-2.1	310.5	308.4	12-41(S2)	
= 1.2 K; RMSE = 1.4 F	Bias = -0.8 K;	0.9	314.7	315.5	12-37(R)	12:30
		0.2	314.4	314.6	12-36(R)	
		-0.4	314.1	313.7	12-44(R)	
		0.1	317.0	317.1	9-36(S2)	
		-1.3	318.1	316.8	9-37(S2)	
		-0.6	314.9	314.4	12-40(S2)	
		-1.6	316.0	314.4	12-41(S2)	
		-1.7	317.9	316.2	9-40(S1)	
		-2.9	318.5	315.6	9-41(S1)	
		-1.2	317.2	316.0	12-33(S1)	

Comparison between the land surface temperature extracted from the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) images using the *split-window* algorithm given in Eq. (6) and the values measured in situ with the Apogee instrument for every individual tree

Total bias = -1.3 K; total $\sigma = 0.9$ K; total RMSE = 1.6 K

Table 3

The notation used for the individual trees refers to the tree position in the olive orchard (irrigation treatment in brackets).

same crop line (Fig. 7b and e); and (iii) from individual trees (Fig. 7c and f). The ENVI (Research Systems Inc., USA) image processing software was used to extract image data and to calculate vegetation indices used to separate scene components. Different Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) thresholds were applied to the imagery to successfully separate pure crowns from shadows and sunlit soil pixels, therefore enabling the estimation of the surface temperature from the pure crown component minimizing the thermal mixture of soil and shadowed soil components (Fig. 7df). This was of critical importance due to the large thermal differences between vegetation (tree crowns) and bare soil, yielding differences $(T_{soil} - T_c)$ of up to 8 K at 7:30 GMT, 13 K at 9:30 GMT and 20 K at 12:30 GMT. The split-window algorithm given in Eq. (6) was applied to the three AHS images (7:30, 9:30 and 12:30 GMT) and the values for every individual tree was extracted for comparison with the in situ measurements measured by the Apogee instruments installed on the trees. Again a difference on emissivity $\Delta \varepsilon = 0$ was considered, using a mean emissivity value of 0.98 for the tree crown. This value of emissivity was obtained from the ASTER spectral library, considering tree crowns as a mixture of vegetation and trunk. Such value agrees with the emissivity of 10 trees measured in the field with the CIMEL instrument. Results shown in Table 3 indicate an RMSE of 1.6 K obtained between AHS estimated and IRT measured crown temperature. The error obtained on the LST retrieved from AHS images agrees with the expected accuracy when using thermal remote sensing data (see the references given in Section 2.4 for more details). It should be noted that the total bias obtained, 1.3 K, could be corrected from the values, obtaining in



Fig. 8. Temperature differences obtained between each tree (T_c) and the mean temperature of the well-watered reference plots (T_R) from the airborne AHS sensor at the three over flight times: (a, d and g) at 7:30 GMT, (b, e and h) at 9:30 GMT and (c, f and i) at 12:30 GMT. The three levels of study were (a-c) blocks of 12 trees under the same treatment, (d-f) blocks of 4 contiguous trees on the same row and (g-i) individual trees compared with IRTS sensors placed on top of the crown. (j-j) The relationship between tree canopy temperature estimated from the AHS sensor and from the IRTS sensors at the three overflight times.

such case an error of 0.9 K, a value significantly lower than the thermal differences due to water stress.

Results obtained when comparing the thermal differences for all plots relative to those well-watered reference trees ($T_c - T_R$) estimated with the AHS sensor and for the three levels of study are shown in Fig. 8. Significant thermal differences between irrigation treatments could be identified at the three overflight times; 7:30 GMT (Fig. 8a, d and g), 9:30 GMT (Fig. 8b, e and h) and 12:30 GMT (Fig. 8c, f and i), showing higher temperature differences for S1 and S2 deficit irrigation treatments as compared with well-irrigated trees (R). These results are consistent for the three times

of data collection and levels of study, with blocks comprising 12 trees across thee rows under the same irrigation level (Fig. 8a–c), and the smaller treatment blocks comprising four contiguous trees on the same row (Fig. 8d–f). The relationships found for individual trees at the time of the three overflights between ground truth IRTS and airborne AHS estimated $T_c - T_R$ (Fig. 8g–i) were $R^2 = 0.50$ (7:30 GMT), $R^2 = 0.45$ (9:30 GMT) and $R^2 = 0.57$ (12:30 GMT), suggesting that the airborne imagery was able to monitor thermal differences at the individual tree and block levels as function of the water stress. The relationships between single tree temperature obtained from the AHS airborne

182





Fig. 9. (a) Relationship between leaf water potential and $T_c - T_s$ (canopy temperature minus air temperature) obtained with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) imagery at 7:30 GMT, (b) at 9:30 GMT and (c) at 12:30 GMT. (d) The relationship between leaf water potential and $T_c - T_s$ obtained with the infrared thermal sensors collected in the field at 10:00 GMT.

sensor and measured in the field with the IRTS sensors at the three overflight times (Fig. 8j–l) show the capability of this method and the AHS airborne sensor to obtain the absolute temperature of individual trees.

The relationships between leaf water potential measured at 10:00 GMT on each tree, and $T_c - T_a$ estimated from the AHS imagery are shown in Fig. 9a-c for the three overflights at 7:30 ($R^2 = 0.62$), 9:30 $(R^2 = 0.35)$ and 12:30 GMT $(R^2 = 0.25)$. Early morning measurements provided the best results for detecting leaf water potential changes, probably due to minimal temperature differences between soil and vegetation. These results suggest that high-spatial thermal imagery is potentially capable of detecting water stress levels on individual trees as a function of canopy temperature. These results are consistent with the relationship obtained between leaf water potential and the $T_c - T_a$ data measured in the field with the field IRT sensors for each tree (Fig. 9d) yielding $R^2 = 0.51$. The consistency of these results obtained between image-estimated and ground-measured crown temperature enabled the generation of the spatial distribution of $T_c - T_R$ and

 $T_c - T_a$ for each airborne acquisition. The spatial distribution of the crown thermal differences relative to the well-watered reference plots for each overflight (Fig. 10a-c) shows an increasing number of trees with differences larger than 2 K relative to the reference trees. Fig. 10d-f shows the spatial distribution of $T_{\rm c} - T_{\rm a}$ over the course of the day, obtaining differences larger than 4 K at midday (12:30 GMT) and smaller than 1 K in the morning (7:30 GMT). The treatment blocks used for the deficit irrigation experiment part of this study are not detected in the larger scale images presented in Fig. 10, which show the spatial variability of the 1800 orchard trees. The bottom left area with a distinct feature shown was caused by a previous experiment on vegetation cover, which damaged the trees.

It should be noted that accurate LST values could also be achieved with multispectral thermal techniques, like the Temperature and Emissivity Separation (TES) method, developed by Gillespie et al. (1998), which is also capable of providing land surface emissivities. However, this method requires accurate atmospheric



Fig. 10. (a-c) The $T_c - T_R$ (relative temperature difference compared to well-irrigated trees) images obtained with the AHS sensor on 25 July 2004 at three overflight times: (a) at 7:30 GMT, (b) at 9:30 GMT and (c) at 12:30 GMT. (d-f) The $T_c - T_s$ (canopy temperature minus air temperature) images obtained from the AHS sensor on 25 July 2004 at three over fight times: (d) at 7:30 GMT, (e) at 9:30 GMT and (f) at 12:30 GMT. The area represented is the same as that shown in Fig. 1 with a yellow border.

correction and calibration of thermal bands, which is a stricter requirement than the methodology followed herein. The application of the TES and other multispectral methods to the AHS thermal bands for both land surface temperature and emissivity retrieval is a future objective of the authors of this study.

4. Conclusions

This study makes progress on the application of thermal remote sensing methods for water stress detection in non-homogeneous orchard canopies, obtaining temperature estimates of individual tree crowns from airborne imagery. The high-spatial resolution and hyperspectral visible and near-infrared imagery and multispectral thermal data collected with the Airborne Hyperspectral Scanner enabled the study of the spatial and temporal thermal effects of water stress at the tree and orchard block irrigation levels. Leaf water potential, stomatal conductance and photosynthesis measurements in olive trees were shown to be affected during the course of the experiment using three irrigation treatments. Results obtained with the AHS airborne imager and validated with ground-truth IRTS sensors placed over the trees demonstrated that crown thermal variations associated with water stress could be detected at the tree level on the imagery, showing higher temperature differences for S1 and S2 deficit irrigation treatments as compared with well-irrigated trees (R), with differences of up to 4 K at 12:00 GMT. Relationships for the absolute crown temperature between ground IRT sensors and airborne image-based AHS

Anexo I

G. Sepulcre-Cantó et al./Agricultural and Forest Meteorology 136 (2006) 31-44

estimations were $R^2 = 0.50$ (7:30 GMT), $R^2 = 0.45$ (9:30 GMT) and $R^2 = 0.57$ (12:30 GMT). The relationships obtained between leaf water potential and $T_c - T_a$ obtained from the airborne AHS imagery ($R^2 = 0.62$ at 7:30 GMT, $R^2 = 0.35$ at 9:30 GMT and $R^2 = 0.25$ at 12:30 GMT) suggest that high-spatial thermal AHS imagery is potentially capable of detecting water stress at the tree level as function of canopy temperature. The good root mean square deviation obtained for the land surface temperature retrieved from AHS data using a *split-window* algorithm, 1.6 K (or 0.9 K when the bias is corrected), indicate the feasibility for airborne-based within-field thermal variability detection at the tree level in non-homogeneous orchard crop canopies when using high-spatial resolution imagery.

The methods presented here enabled the generation of crown-level maps of $T_c - T_a$ and $T_c - T_R$ at 2.5 m spatial resolution, showing the within-field spatial and diurnal variability of the tree temperature. These methods have potential applications in water stress detection and irrigation scheduling in orchard canopies in the context of precision agriculture.

Acknowledgements

Financial support from the Spanish Ministry of Science and Technology (MCyT) for the projects AGL2002-04407-C03 and AGL2003-01468, and financial support to P.J. Zarco-Tejada from the *Ramón y Cajal* (MCyT) and *Avernoes* (JA) programs are gratefully acknowledged. E. Fereres, O. Pérez-Priego, L. Testi and I. Calatrava are acknowledged for scientific and technical support. We thank J. Díaz and the INTA group for efficient airborne field campaigns providing coordination with field data collection. The UGC members M. Zaragoza, G. Soria, M. Romaguera and J. Cuenca are acknowledged for measurements and technical support in the field campaign. S. Moran and S. Ustin are acknowledged for reviewing the manuscript.

References

Agencia para el Aceite de Oliva, AAO, 2001 (www.tierra.mapya.es). Becker, F., Li, Z., 1990. Towards a local split-window method over land surfaces. Int. J. Remote Sens. 11 (3), 369–393.

- Berliner, P., Osterhuis, D.M., Green, G.C., 1984. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. Agric. Forest Meteorol. 31, 219–230.
- Clawson, K.L., Blad, B.L., 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. Agronomy J. 74, 311–316.
- Dash, P., Göttsche, F.M., Olesen, F.S., 2002. Potential of MSG for surface temperature and emissivity estimation: considerations for real-time applications. Int. J. Remote Sens. 23 (20), 4511– 4518.

- Deschamps, P.Y., Phulpin, T., 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μ m. Boundary Layer Meteorol. 18, 131–143.
- Fuchs, M., Tanner, C.B., 1966. Infrared thermometry of vegetation. Agronomy J. 58, 597-601.
- Agronomy J. ed., 597–604. Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., Kakle, A.B., 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 36, 1113–1126.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., 1978. Extending the "degree day" concept of phenomenological development to include water stress effects. Ecology 59, 431–433.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Forest Meterol. 24, 45-55. Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring
- Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agric. Meteorol. 27, 59– 70.
- Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., 1981. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. In: Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, France, pp. 399-406.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1977a. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Resour. Res. 13, 651–656.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Ehrler, W.L., 1977b. Crop temperature reveals stress. Crop Soils 29, 10–13.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, J.R., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17 (4), 1133–1138.
- Jacob, F., Petitcolin, F., Schmugge, T., Vermote, E., French, A., Ogawa, K., 2004. Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors. Remote Sens. Environ. 90, 137-152.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., 2003. A generalized singlechannel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. J. Geophys. Res. 18 (D22), 4688.
- Jones, H.G., 1999. Use of the infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as possible aid to irrigation scheduling. Agric. Forest Meteorol. 95, 139–149.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M.M., Grant, O.M., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to gravepine. J. Exp. Bot. 53, 2249–2260.
- Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P., Nerry, F., Ottlé, C., 2004. Land surface temperature retrieval techniques and applications: case of AVHRR. In: Quattrochi, D.A., Luvall, J.C. (Eds.), Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes. CRC Press, Florida, USA, pp. 33-109.
 McClain, E.P., Pichel, W.G., Walton, C.C., 1985. Comparative per-
- McClain, E.P., Pichel, W.G., Walton, C.C., 1985. Comparative performance of AVHRR-Based multichannel sea surface temperatures. J. Geophys. Res. 90 (11), 587–601.
- McMillin, L.M., 1975. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption. J. Geophys. Res. 80, 5113–5117.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vida, A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sens. Environ. 46, 246– 263.

186

- Norman, J.M., Divakarla, M., Goel, N.S., 1995. Algorithms for extracting information from remote terminal-IR observations of the earth's surface. Remote Sens. Environ. 51, 157-168.
- Orgaz, F., Fereres, E., 2004. In: Fereres, E. (Ed.), 1984. Viability in Adaptative Mechanisms to Water Deficits in Annual and Perennial Acaptative Mechanisms to water Dencits in Annual and Perennial Crop Plants, vol. 131. Bulletin Société Botanique de France. Actualités Botaniques, pp. 17–32.
 Prata, A.J., 1993. Land surface temperatures derived from the AVHRR and ATSR. 1. Theory. J. Geophys. Res. 89 (16), 689–702.
- nato A15ke Frinkovj, z. Ospije, Kes & (10), 602–602.
 Pata, A.J., 1994. Land surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer. J. Geophys. Res. 99, 13025–13058.
 Price, J.C., 1984. Land surface measurements from the split window
- channels of the NOAA 7 AVHRR data. Int. J. Remote Sens. 20, 2367-2393
- Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P., 2001. A monowindow algorithm for retrieving land surface temperature from Lansat TM data and its aplication to the Israel-Egypt border region. Int. J. Remote Sens. 22 (18), 3719-3746.
- Sobrino, J.A., Coll, C., Caselles, V., 1991. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR Channels 4 and 5. Remote Sens. Environ. 38, 19–34.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, M., Sòria, G., 2004a. Single-channel and two channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. Int. J. Remote Sens. 25, 215–230.

- Sobrino, J.A., Li, Z.L., Stoll, M.P., 1993. Impact of the atmospheric transmittance and total water vapour content in the algorithms for stimating sea surface temperatures. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 33, 946-952.
- Sobrino, J.A., Li, Z.L., Stoll, M.P., Becker, F., 1994. Improved ents in the split-window technique for land surface temperature determi-nation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 32, 243–253.Sobrino, J.A., Li, Z.L., Stoll, M.P., Becker, F., 1996. Multi-channel
- and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. Int. J. Remote Sens. 17, 2089–2114.
- Sobrino, J.A., Raissouni, N., 2000, Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring application to Morocco. Int. J. Remote Sens. 20 (2), 353-366.
- Sohrino, J.A., Soira, G., Prata, A.J., 2004b. Surface temperature retrieval from Along Track Scanning Radiometer 2 data: algo-rithms and validation. J. Geophys. Res. 109, D11101, doi:10.1029/ 2002UP02122 2003JD004212. Sobrino, J.A., Li, Z.-L., Sòria, G., Jiménez, J.C., 2002. Land surface
- Sonno, J.A., L., Z.-L., Sona, G., Jimenez, J.C., 2002. Land samace temperature and emissivity retrieval from remote sensing data. Recent Res. Devel. Geophysics 4, 21–44.
 Tammer, C.B., 1963. Plant temperatures. Agronomy J. 55, 210–211.
 Testi, L., 2003. Medida yu modelización de la evaporación de Planta-ciones de Olivo (Olea europaea L.). PhD Thesis. Universidad de Control de Olivo (Olea europaea L.). Cordoba, Spain.
- Wanjura, D.F., Maas, S.C., Winslow, D.R., Upchurch, D.R., 2004. Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn. Comput. Electron. Agric. 44 (1), 33-48.

Anexo II

Anexo II



Available online at www.sciencedirect.com

Remote Sensing Environment

ww.elsevier.com/locate/rs

Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

Monitoring yield and fruit quality parameters in open-canopy tree crops under water stress. Implications for ASTER

G. Sepulcre-Cantó^a, P.J. Zarco-Tejada^{a,*}, J.C. Jiménez-Muñoz^b, J.A. Sobrino^b, M.A. Soriano^c, E. Fereres^{a,c}, V. Vega^d, M. Pastor^d

* Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Córdoba, Spain ^b Universidad de Valencia, Valencia, Spain ^c Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Spain ^d CIFA Córdoba, IFAPA, Junta de Andalucía, Spain

Received 30 June 2006; received in revised form 21 September 2006; accepted 23 September 2006

Abstract

Work on water stress detection at tree and orchard levels using a high-spatial airborne thermal sensor is presented, showing its connection with yield and some fruit quality indicators in olive and peach commercial orchards under different irrigation regimes. Two airborne campaigns were conducted with the *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS) over olive and peach orchards located in Córdoba, southern Spain. The AHS sensor was flown at three different times on 25 July 2004 and 16 July 2005, collecting 2 m spatial resolution imagery in 80 spectral bands in the 0.43 12.5 µm spectral range. Thermal bands were assessed for the retrieval of land surface temperature using the *split-window* algorithm and TES (*Temperature-Emissivity-Separation*) method, separating pure crowns from shadows and suntil soil pixels using the reflectance bands. Stere mater potential and stomatal conductance were measured on selected trees at the time of airborne flights over the orchards. Tree fruit yield and quality parameters such as oil, weight and water content (for the olive trees), and fruit volume and weight (for the peach trees) were obtained at harvest and through laboratory analysis. Relationships between airborne-estimated crown temperature minus air temperature and stem water potential out $\rho^2 = 0.81$ (200 GMT) at the olive tree level, and $\rho^2 = 0.81$ (200 GMT) at the treatment level in peach trees. These results demonstrate that water stress can be detected at the crown level even under the usual water management conditions of commercial orchards. Regressions of yield and $\rho^2 = 0.81$ (0.00 GMT) at the olive tree level, and $\rho^2 = 0.81$ (200 GMT) at the olive tree level, and $\rho^2 = 0.81$ (0.00 GMT) at the treatment level in peach trees. These results demonstrate that water stress can be detected at the crown level even under the usual water management conditions of commercial orchards. Regressions of yield and fruit quality against remote sensing estimates of crown temperature as an indicator of ware stress, yielded $r^2 =$

Keywords: Water stress; Thermal; Fruit quality; Airborne; TES; AHS; ASTER; Remote sensing

1. Introduction

Corresponding author. Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Alameda del Obispo, s/n, 14004 — Córdoba, Spain. Tel: - 34 957 499 280, -334 676 954 937; fax: -34 957 499 252. *E-mail address:* pzarce@ias.exics.ex(P.J. Zarce-Tejada). URL: http://www.ias.exic.es/pzarco (P.J. Zarce-Tejada).

0034-4257/\$ - see front matter \odot 2006 Elsevier Inc. All rights reserved. doi:10.1016/j.rse.2006.09.014

Water stress develops in crops when evaporative loss exceeds the supply of water from the soil (Slatyer, 1967). As a result of the decline in plant water status many physiological processes are affected, such as leaf expansion and other plant functions (Hsiao, 1973). Most crops are very sensitive to water deficits, and their yield may be negatively affected even by short-term water deficits (Hsiao et al., 1976).



Leaf water potential (LWP) is commonly used to characterize plant water status, (Hsiao, 1990) but, in remote sensing studies, leaf water content is commonly used. Leaf water content is measured as the amount of water per unit leaf area, and several published studies demonstrate its successful estimation using remote sensing indices such as a water band index (WBI) (Peñuelas et al., 1993, 1997), moisture stress index (MSI) (Rock et al., 1986) or the normalized difference water index (NDWI) (Gao, 1996) among others. These indices are developed from near infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) liquid water absorption bands. These studies have been conducted using spectroradiometers as a basis for future field-scale and aircraft/satellite-based measurements (Harris et al., 2005), using airborne sensors such as the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) (Serrano et al., 2000), and at global scales with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) reflectance spectra and radiative transfer simulation models (Zarco-Tejada et al., 2003). Maps of leaf and canopy water content are important for agriculture and forestry (Gao & Goetz, 1995), drought assessments (Peñuelas et al., 1993), and susceptibility to fire (Ustin et al., 1998)

Although water content in vegetation canopies can be assessed by remote sensing, leaf water potential is a more precise indicator of the plant water status for predicting effects of water deficits on crop yields because small changes in the relative water content of leaf tissues corresponds to large changes in leaf water potential (Acevedo et al., 1979; Kramer & Boyer, 1995). Changes in leaf water content that may be easily detectable normally occur at advanced stages of dehydration, being therefore a parameter of limited interest for predicting crop water status for situations where high crop productivity levels are sought. Even though there is interest in obtaining leaf water potential information, it is often suggested that pre-dawn measurements of leaf water potential are the most accurate estimate soil moisture status (Cowan, 1965; Slatyer, 1967) but the inconvenience and narrowness of time window makes this surement impractical. The dynamics of the daily course of leaf water potential (LWP) makes it difficult to determine the appropriate time of measurement; however, LWP in sunny days relatively constant for several hours around solar noon, the time when it reaches its minimum value (Kramer & Boyer, 1995). Shackel et al. (1997) have found that stem water potential (SWP) is more reliable than leaf water potential as an indicator of plant water status in a number of tree crops. At any rate, the labour involved, together with the limitations outlined above, limits the number of water potential observations that can be made (Stimson et al., 2005). When the plant is stressed and transpiration decreases, the crop canopy temperature tends to rise appreciably because of the reduction in evaporative cooling. This is the basis for the approach of sensing crop stress by monitoring canopy temperature with thermal infrared radiation (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981, 1977) proposing the crop water stress index (CWSI). This technique has been widely studied and developed mainly at ground level using hand-held thermal infrared thermometers (Idso et al., 1978; Jackson & Pinter, 1981; Jackson et al., 1977) and, more recently, using thermal scanners (Wanjura et al., 2004) and thermal cameras (Cohen et al., 2005; Leinonen & Jones, 2004).

Some studies have focused in the combination of vegetation indices and surface temperature, proposing the water deficit index (WDI) (Moran et al., 1994) for satellite image studies. Recent studies use the relationship between vegetation indices and surface temperature at regional scales for assessment of vegetation condition and water stress using satellite imagery (Jang et al., 2006). At the airbome level, recent work has shown the detection of water stress at in a closed cotton canopy (Detar et al., 2006).

Despite the potential usefulness of remote sensing for thermal detection in vegetation canopies, studies where thermal imagery is used for water stress detection are limited, in particular for open canopies such as tree crops. There is a lack of sensors onboard satellite platforms with optimal spatial reso lution to monitor orchard crops at the tree scale (i.e. ideally 0.5 to 2 m spatial resolution in the thermal region). Even in the case of high-spatial resolution imagery collected from airborne sensors, shadows and direct soil influences involve problems in the canopy temperature retrieval due to the canopy heteroge-neity characteristic in orchard canopies. Nevertheless, recent studies on surface temperature estimation with high-spatial resolution remote sensing imagery have proved that this technology is available for obtaining accurate measurements of surface temperature. Different methods can be used to retrieve land surface temperature from thermal infrared data provided by only one or two thermal bands, as for example the single channel methods or the split-window technique. Land surface temperature and emissivity can be also obtained from multispectral thermal data using the Temperature and Emissivity Separation (TES) algorithm (Gillespie et al., 1998). A detailed review of methods can be found in Sobrino et al. (2002), Dash et al. (2002) and Kerr et al. (2004). The feasibility of these methods for retrieving land surface temperature from ten thermal-infrared bands of the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) is assessed in Sobrino et al. (2006). In this study root mean square errors of 1.4 K were obtained for olive tree canopy temperature. In addition, Sepulcre-Cantó et al. (2006) demonstrated in olive orchards that the AHS high-spatial resolution imagery enabled the study of spatial and temporal thermal effects of water stress at tree and orchard levels.

It has been long known that water stress affects not only fruit yield but also, fruit quality (Fereres et al., 2003; Uriu & Magness 1967). In the case of olive and peach trees, Moriana et al. (2003) and Girona et al. (2003) have shown the effects of sub-optimal irrigation on fruit yields. Deficit irrigation research in orchard crops aims at saving irrigation water, while increasing or maintaining income, even if yield is affected (reviewed by Fereres & Soriano, in press). To implement deficit irrigation strategies, precise detection and monitoring of water stress is essential. Thus, the detection of small thermal differences (0.5 to 2 K), if associated with water-deficit stress levels in orchard crops at the tree level, could be a very useful detection and monitoring technique to manage deficit irrigation. The work presented here focuses on the detection of tree-crown temperature differences as affected by water stress in a commercial peach orchard under several deficit irrigation levels. Previous studies were conducted under more severe water stress conditions that effected large differences in olive canopy temperature (Sepulcre-Cantó et al., 2006). The work

456

Study site	Treatment label	Doses applied	Period of application
Olive trees (thermal validation)	R	100% ET	From mid-June to mid-October
	S1	25% ET	From mid-June to mid-October
	S2	43% ET	From mid-June to the first week of July and from the first week of September to mid-October
		Not irrigated	From the first week of July to the first week of September
Olive trees (vield and quality	Ι	100% ET	From mid-June to mid-October
measurements)	П	50% ET	From the first week of July to mid-September
		100% ET	From mid-June to the first week of July and from mid-September to mid-October
	ш	25% ET 100%	From the first week of August until mid-September From mid-June to the fist week
		ET	of August and from mid- September to mid-October
	IV	100% ET	From mid-June to mid-July and from mid-September to mid- October
		Not irrigated	From mid-July to mid- September
Peach trees	A	Non irrigated	From the fist week of May to the fist week of July and from mid- August to mid-September
		200% ET	From the last week of June to mid-July*
		100% ET	From half July to mid-August.
	в	67% ET	From the first week of may to mid-September
	C	100% ET	From the first week of may to mid-September
	D	133% ET	From the first week of may to mid-September.

*Beginning of the Stage III of fruit growth (Mitchell & Chalmers, 1982).

here aims at detecting small differences in canopy temperatures under both extreme and commercial orchard irrigation conditions, and to assess their potential for tree-level water stress detection in relation to olive and peach fruit yield and quality. We present also work on the potential for extrapolating these methods to ASTER satellite for monitoring orchard canopies at larger scales.

2. Materials and methods

2.1. Study sites

The ground truth datasets and aircraft images were acquired in two different orchards (an experimental olive orchard and a commercial peach orchard) located in Córdoba, southern Spain (37° 48' N, 4° 48' W) in summer 2004 and 2005. The climate of the area is Mediterranean with an average annual minfall of 650 mm, concentrated from autumn to spring, and a reference annual evapotranspiration (ETo) of 1390 mm. The olive orchard (Olea europaea L cv. 'Arbequino') used for the experiment has an extension of 4 ha, and was planted in 1997 in a 7 m×3.5 m pattem (408 trees ha ⁻¹). The mean crown size of the olive trees was 50 m³ (approximately with a spherical crown shape) with 6 m of height. Drip irrigation method was used for supplying accurate water doses at tree level. The water stress study and thermal imagery validation was conducted over an area of 6 rows of 18 olive trees (2646 m²) where three drip irrigation treatments were randomly applied (Table 1). A detailed description of blocks size and irrigation treatments in this experimental orchard can be found in Sepulcre-Cantó et al. (2006). Yield and olive fruit quality measurements were conducted over an area of 15

(a)



Fig. 1. (a) Image of the peach orchard acquired on 16 July 2005 with the Airborne Hyperspectral Scattner (AHS). The study area used is shown under a yellow square. (b) A close up of the study area where the squares represent the experimental plots of trees under the same irrigation treatment. The band used for the false colour images were: band 2 ($\lambda\!=\!4.75$ sm) for blue colour, band 9 ($\lambda\!=\!685$ nm) for red colour, and band 12 ($\lambda\!=\!0.775$ nm) for green colour.



458

G. Sepulcre-Cantó et al. / Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

rows of 24 olive trees (360 trees; 8820 m²) where four drip irrigation treatments were applied (Table 1). These irrigation treatments were designed as part of deficit irrigation trials conducted in the orchard.

The second study site is in a commercial peach orchard (*Pranus persica* L., cv. 'Baby Gold') with an extension of 3 ha, grown on a loam soil. The orchard was planted in 1993 with trees at 5 m×3.25 m with rows oriented in the N–S direction. The mean crown size of the peach trees (approximately with a spherical shape) was 25 m³ with 4 m of height. Each experimental plot had 12 trees, out of which only the central two trees were monitored. The soil had a cover crop that was mowed frequently. Four drip irrigation treatments (Table 1) replicated four times were applied within an area of 6 rows of 32 peach trees each (3120 m²) (Fig. 1).

2.2. Field data collection

During the summer of 2004 and 2005, olive tree temperature was monitored. Infrared sensors covering the 6.5-14 µm range (model IRTS-P, Apogee, Utah, USA) were placed over 10 trees comprising the three irrigation treatments (Sepulcre-Cantó et al., 2006), recording the mean temperature at 5-minute intervals in 3 dataloggers (model CR10X, Campbell Sci., UT, USA). A thermal camera (Snapshot, Infrared Solutions Inc., MN, USA) was used to acquire thermal images from olive trees under different irrigation treatments at 15:00 GMT during summer 2004. In addition, a hand-held thermal radiometer (model Raynger II, Raytek, California, USA) with a single broadband covering the range 8-14 µm was used to measure tree temperatures at 12:00 GMT from olive trees (in summer 2004 and 2005), and from peach trees (in summer 2005). Air temperature (Ta) was continuously measured in the field with a Vaisala Weather Transmitter (model WXT510, Vaisala Oy, Helsinki, Finland) installed in the olive orchard at 1 m over a control tree (6 m above ground). In the peach orchard, air temperature values were obtained from an automated meteorological station located at 1 km from the orchard.

A pressure bomb (PWSC Model 3000, Soilmoisture Equipment Corp., California, USA) was used to measure stem water potential (SWP; Shackel et al., 1997) from 11 olive trees covering the 3 irrigation treatments, measuring weekly at 12:00 GMT. Similarly, SWP from the peach trees was measured weekly at 12:00 GMT. This was done for all 32 trees covering the 4 irrigation treatments. In addition, stomatal conductance (GI) in the olive orchard was measured once a week at 10:00 GMT from 3 trees with a leaf steady-state porometer (model PMR-4, PP Systems, Hitchin Herts, Great Britain). These measurements (SWP and GI) were conducted from July to October in 2004 and 2005.

2.3. Remote sensing airborne campaigns

Two airborne campaigns were conducted by the Spanish Aerospace Institute (INTA) with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) (developed by Sensytech Inc., currently Argon St Inc., USA). Flights over the olive orchard were made on 25 July 2004 and on 16 July 2005 at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT, in order to study changes in water stress over the course of the day as function of the irrigation treatments applied. Flights over the peach orchard were made at 9:00 GMT in 2004, and at 9:00 and 13:00 GMT in 2005.

The AHS sensor has 80 spectral bands in the 0.43 μ m to 12.5 μ m spectral range. The 80 bands are distributed in 4 ports (VIS/NIR, SWIR, MWIR and TIR). The sensor has a 90° FOV and a 2.5 mrad instantaneous field of view (IFOV). The aircraft flew at 1000 m altitude above ground level (AGL), obtaining 6000×2000 m² images at 2 m spatial resolution. The flight paths were kept in the solar plane and designed so that the study orchard was in the centre of the images. Imagery was processed applying geometric, radiometric and atmospheric corrections. Image atmospheric correction was done using the MODTRAN-4 radiative transfer code (Berk et al., 1999) and in situ radiosoundings launched at 7:00 and 12:00 GMT on 16 July 2005. A full description of the AHS bands calibration and the radiometric and the atmospheric correction process can be found in Sobrino et al. (2006).

In the 2005 campaign, a detailed study on water potential as a function of time was conducted, measuring stem water potential from 18 trees and stomatal conductance from 12 trees simultaneous to the three overflight times over the olive orchard. During both 2004 and 2005 campaigns, SWP of the peach trees was measured four days previous to the airborne acquisitions.

2.4. Airborne temperature retrieval and ASTER simulation

Land surface temperature (LST) was retrieved from AHS thermal infrared data acquired in 2004 and 2005 using the splitwindow algorithm described in Sepulere-Cantó et al. (2006):

$$T_{s} = T_{75} + 0.4850(T_{75} - T_{79}) + 0.0068(T_{75} - T_{79})^{2} + 0.0798 + (47.15 - 10.80W)(1-\varepsilon)$$
(1)
+ (-49.05 + 21.53W) $\Delta \varepsilon$

where $T_{\rm s}$ is the LST (in K), T_{75} and T_{79} are the *at-sensor* brightness temperatures (K) of the AHS thermal bands 75 (10.069 µm) and 79 (12.347 µm), $\varepsilon = (\varepsilon_{75} + \varepsilon_{79})/2$ and $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_{75} - \varepsilon_{79})$ are the mean effective emissivity and the emissivity difference, and *W* is the total atmospheric water vapour content (g cm²). In addition, the TES algorithm adapted to AHS data (Sobrino et al., 2006) was also applied to the imagery acquired in 2005, because this method requires an accurate atmospheric correction and atmospheric soundings that were launched near to the AHS overpass only in 2005. According to the results presented in Sepulcre-Cantó et al. (2006), LST can be retrieved from AHS data with root mean square errors (RMSE) lower than 1.5 K.

In order to study the feasibility of using medium resolution satellite sensors such as ASTER (90 m spatial resolution) for water stress detection in open-tree canopies, a degradation of the spatial resolution was conducted to assess the effects of crown-shadow-soil temperature aggregation on 90 m pixels, as well as the spectral characteristics of the ASTER sensor on board TERRA satellite. The ASTER sensor has 5 thermal bands in the 8–12 µm spectral region from 10 to 14, with spectral

(2)

(4)

ranges of 8.125-8.475, 8.475-8.825, 8.925-9.275, 10.25-10.95 and 10.95-11.65 µm (Abrams, 2000; Yamaguchi et al., 1998). The scaling study was conducted using the radiative transfer equation applied to the thermal infrared spectral region and to a certain sensor band (i):

$$L_{\text{sensor},i} = [\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i) L_i^{\downarrow}] \tau_i + L_i^{\uparrow}$$

where L_{sensor} is the radiance measured by the sensor, ε ; and T_{s} are the surface emissivity and temperature respectively, τ is the atmospheric transmissivity, L^{\dagger} is the up-welling path radiance, L^{\downarrow} is the down-welling sky irradiance divided by π , and $B_{i}(T_{s})$ is the channel radiance which would be measured if the surface was a blackbody (ε =1) at temperature T_s , defined by the Planck law (Eq. (3)).

$$B_i(T_s) = \frac{C_1}{\lambda_i^5 \left[\exp\left(\frac{C_s}{\lambda_i T_i}\right) - 1 \right]}$$
(3)

with $C_1 = 1.19104 \times 10^8$ W μ m⁴ m⁻² sr⁻¹, $C_2 = 14387.7$ μ m K, and λ_i the effective wavelength (in μ m) defined as in Eq. (4):

$$\lambda_i = -\frac{\int_0^\infty \lambda f_i(\lambda) \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty f_i(\lambda) \mathrm{d}\lambda}$$

in which $f_i(\lambda)$ is the spectral response of the sensor in channel *i*.

Eq. (2) was used to simulate the at-sensor radiance (L_{sensor}) for each ASTER thermal band. For this purpose, the land surface temperature (T_s) and emissivity (ε) obtained from the AHS data at 2 m spatial resolution sensor was used. Simulated ASTER emissivities were estimated using linear relationships between ASTER and AHS band emissivities, which were obtained from a dataset of emissivity spectra extracted from the ASTER spectral library (http://speclib.jpl.nasa.gov). The atmospheric parameters (τ , L^{\dagger} , L^{\downarrow}) were obtained from the atmospheric soundings and the MODTRAN-4, using the filter functions of the ASTER bands. Then, the simulated ASTER atsensor radiance at 2 m spatial resolution was aggregated to simulate pixels of $15\!\times\!20~m^2$ spatial resolution comprising 12 trees under the same irrigation treatment. This simulation study, using the same ASTER spectral bands and aggregated pixels for stress detection as function of irrigation level, would assess the

Table 2

Stem water potential (SWP) and stomatal conductance (Gi) measured at the beginning of the irrigation period (first of May for the peach trees, and at the end of June for the olive trees), and the values measured in the period of maximum stress (to mid September)

	Irrigation treatments	Beginnin irrigation	Period of maximum water stress		
	\$1(14 FT)	SWP (MPa)	Gl (mm s ⁻¹)	SWP (MPa)	Gl (mm s ⁻¹)
Olive trees	\$1 (1/4 ET)	-1.4	4.7	-3.5	1.5
	S2 (1/4 ET)	-1.1	13.7	-3.1	3.0
	R (ET)	-0.9	13.0	-1.2	5.0
Peach trees	A (2/3 ET)	-0.35	-	-1.7	-
	B (2/3 ET)	-0.35	-	-1.5	-
	C (ET)	-0.35	-	-1.2	-
	D (4/3 ET)	-0.35	-	-0.8	-



459

Fig. 2. Differences between canopy (Tc) and air (Ta) temperature (K) for the ent irrigation treatments obtai d with a hand-held infrared ther 12:00 GMT from olive trees: (a) in the 2004 summer campaign and (b) in the

applicability of medium resolution thermal sensors for the global monitoring of open-canopy tree crops.

2.5. Yield and fruit quality parameters data

The harvest of the olive trees was conducted using a mechanical shaker. All the olives harvested from each tree were weighed for to obtain olive yield (fresh weight, kg tree 1), and a representative sample of 2 kg was selected for the analysis. The oil content in the fresh fruit (oil weight per fresh weight, g g 1) was determined by nuclear magnetic resonance (Hidalgo & Zamora, 2003), and oil yield (kg tree $^1)$ was calculated as the product of olive yield by oil content in the fresh fruit. Fruit water content was obtained drying a sub-sample in an oven until constant weight, and oil content was standardized with respect to the dry weight.

In the peach orchard, trees were harvested manually in three times to optimise ripening. All the fruits of the 32 monitored trees were counted and weighted in the field at each harvest, and all the fruit diameters were measured. Total peach yield, fresh fruit weight and fruit diameter were determined. The total soluble solids content (TSS) of each monitored peach tree was obtained at each harvest in a representative sample of ten fruits, using a digital calibrated refractometer (model ATC-1E, Atago



460

Fig. 3. Differences between canopy (Tc) and air (Ta) temperature (K) for the different irrigation treatments obtained with a hand-held infrared thermometer at 12:00 GMT from peach trees in the 2005 summer campaign. Irrigation period ended on 13 September (day 256, dashed line).

C., Tokio, Japan). The final values of fruit weight, fruit diameter and total soluble solids content were the weighted average for the three harvests.



3.1. Field measurements for water stress detection

The stem water potential (SWP) and stomatal conductance (GI) measurements in the olive orchard reflected the treatment differences in water supply in 2005 (Table 2). The values obtained for SWP and GI were lower in the trees under deficit irrigation treatments, showing an increment in the differences between treatments as the season went on. These results agreed with those obtained during the previous year, on the summer 2004 campaign (Sepulcre-Cantó et al., 2006). In the peach orchard in 2005, SWP exhibited trends that were similar to those observed in the olive orchard (Table 2), although the SWP values were much higher in peach than in olive trees. The same occurred in 2004 when measurements varied from -0.35 MPa for all treatments at the beginning of the irrigation season to -0.8 MPa for D treatment and -0.9 MPa for C (farm) treatment, and -1.3 MPa for B and A treatments at the moment of maximum water stress (end of the irrigation).

obtained for the different irrigation treatments using the hand-







Fig. 5. Thermal images of: a) a deficit irrigation olive tree canopy and b) a well watered olive tree canopy.

held infrared thermometer are shown in Fig. 2 for olive trees and in Fig. 3 for peach trees. In both cases, olive and peach trees, Tc-Ta differences consistently varied with the applied irrigation treatments. The tree Tc-Ta values were greater under deficit irrigation than in the well irrigated treatments. Treatment differences were less in the case of the peach trees because the level of water stress imposed in a commercial orchard was much less than that applied in the olive experiment, as indicated by the SWP values (Table 2). The Tc-Ta values obtained for the olive trees at half of September were 7.2 K for S1 and S2 treatment, 6.1 K for S2 treatment in 2004; and 5.8 K for S1 treatment, 6.1 K for S2 treatment, and 5.2 K for R treatment in 2005 (Fig. 2a, b). Peach-tree temperature measured with the handheld thermal sensor during the 2005 summer campaign (Fig. 3) showed differences between Tc-Ta of 4.4 K for treatment A and 4.3 for treatment B trees at half of September, while Tc-Ta yielded 3.3 K for trees under the farm schedule (treatment C) and 2.5 K for trees under D treatment (4/3 ET).

Top-of-the-canopy and air temperature were monitored continuously with infrared sensors and a Vaisala throughout the years 2004 and 2005 on olive trees. The maximum tempenature differences between treatments were observed at 14:00 GMT, although the Tc–Ta values for the different irrigation treatments were lower than those obtained at 12:00 GMT. The Tc–Ta time series at 14:00 GMT are presented in Fig. 4 for July to December 2004, and for January to December 2005. Differences between treatments can be observed from June to November, detecting the recovery after the first autumn rainfall in November 2004 and 2005. Tc–Ta yielded 4 K for trees under deficit irrigation treatment S1 in the period of maximum stress (from August to October), while Tc–Ta yielded 2 K for trees under R treatment in 2004 and in 2005.

In addition, field measurements with a thermal camera were conducted in summer 2004, acquiring thermal images of the olive crowns under different irrigation treatments (Fig. 5). Differences between crown temperatures as a function of the applied water deficits were detected, furthermore demonstrating a greater thermal homogeneity for the crown temperature in well-watered trees. The canopy temperature variability was proposed by Clawson and Blad (1982) to signal the onset of plant water stress in com but there are not studies applying this methodology to trees. Thermal images acquired with the thermal camera were compared with the hand-held infrared radiometer and with infrared sensors placed on top of the tree to asses the validity of the crown-thermal imagery measurements as an indicator of the mean crown temperature for the tree. The values compared were the mean lateral temperature of the crown obtained from the thermal imagery with the mean top of the crown temperature measured with the infrared sensors and the lateral point-measurement of the crown temperature made with the thermal gun, all the instruments measuring at the same time. The images of the trees under deficit irrigation treatments showed higher temperatures than images of well irrigated trees (Table 3). The mean crown temperature per treatment obtained from the thermal camera imagery on 4 October 2004 for trees under deficit irrigation treatment S1 was 35.1 °C (standard deviation of 1.3 °C) for a measured SWP of -2.8 MPa, while the mean crown temperature obtained for trees under irrigation treatment R was 33.0 °C (standard deviation of 1.2 °C) for a measured SWP of -1.2 MPa (Table 3). Fig. 6 (a,b) show the relationships between the temperature obtained with the thermal camera imagery, and the temperature measured with the handheld thermometer ($r^2=0.44$) (Fig. 6a) and with the infrared sensors placed on top of the trees ($r^2=0.59$) (Fig. 6b) on 4 October 2004. The relationships obtained in the field between stem water potential and the crown temperature obtained from

Table 3

Stem water potential, and mean olive crown temperature measured with the hand-held thermometer and obtained from the thermal camera imagery, with its standard deviation values (SD), obtained from olive trees on 4 October 2004

Treatment	Stem	Olive crown tempera	iture (°C)		
	water potential (MPa)	Infrared radiometer	Thermal image	Image SD	
R	-1.19	34.4	33.0	1.2	
S2	-1.69	34.4	34.0	1.2	
S1	-2.84	35.7	35.1	1.3	





Fig. 6. Relationship between crown temperatures obtained from the thermal camera imagery, and measured with: a) the hand-held thermometer and b) with the infrared sensors placed on top of the olive trees, in the olive orchard on 4 October 2004. c) Relationship between temperature obtained from the thermal camera imagery and stem water potential (SWP). d) Relationship between stem water potential (SWP) and the standard deviation of the canopy temperature obtained from the thermal camera imagery.

the thermal camera imagery (Fig. 6c) demonstrate the successful use of the thermal camera imagery as indicator of water stress at the tree level. Moreover, the standard deviation of the crown temperature obtained with the camera imagery indicates the level of heterogeneity for the crown canopy temperature as function of the water stress level. This is consistent with the determination coefficient of $r^2 = 0.48$ obtained between standard deviation of the imagery and stem water potential (Fig. 6d). 3.2. Detection of irrigation levels in olive and peach orchards from airborne thermal imagery

Temperature values per irrigation treatments obtained from airborne AHS imagery at 2 m spatial resolution for 2004 and 2005 campaigns are presented in Table 4 for olive trees and in Table 5 for peach tress. Airborne remote sensing-derived estimates for Te and Te–Ta for each orchard tree and irrigation treatment are

Table 4

462

Temperature (Tc) and differe	nces between c	anopy and ai	r temperature ((Te-Ta)) for olive	irrigation	treatments,	obtained h	by means of	the airborne	AHS s	ensor at 3
different times	on 25 July 20	04 and on 16 J	uly 2005. S1	and S2 are tw	o defici	it irrigatio	n treatmen	its and R in	dicates the	well irrigate	ed treatment		

Time	Tc (K)		Te-Ta (K)			
(GMT)	\$1	\$2	R	S1	S2	R
7:30	303.5±0.1	303.5±0.4	303.0±0.2	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.4	0.6±0.2
9:30	309.8±0.3	309.7±0.5	309.0 ± 0.2	1.7 ± 0.3	1.6 ± 0.5	0.9 ± 0.2
12:30	315.4±0.6	315.0±0.3	314.4 ± 0.4	3.3 ± 0.6	2.9 ± 0.3	2.3 ± 0.4
7:30	299.9±0.2	299.7±0.5	299.1±0.2	1.8 ± 0.2	1.7 ± 0.5	1.1 ± 0.2
9:30	306.1±0.5	306.0 ± 1.0	304.6±0.6	3.5 ± 0.5	3.3 ± 1.0	2.1 ± 0.6
12:30	317.1±0.5	317.0±1.0	315.2 ± 0.7	4.1 ± 0.5	4.0 ± 1.0	2.3 ± 0.7
	(GMT) 7:30 9:30 12:30 7:30 9:30 12:30	$\begin{array}{c} \mbox{(GMT)} & \mbox{1} \\ \mbox{(GMT)} & \mbox{3} \\ \mbox{3} \\ \mbox{2} \\ \mbox{3} \\ \mbox{2} \\ \mbox{3} \\ \mbox{2} \\ \mbox{3} \mbox{3} \\ \mbox{3} \mbox{3} \\ \mbox{3} $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $

Table 5

Temperature differences (Te-Ta) obtained between canopy (Te) and air temperature for the different irrigation treatments (A, B, C and D) in peach, obtained by means of the AHS sensor at different overflight times on 25 July 2004 and on 16 July 2005

Year	Time	Time Tc (K)					Te-Ta (K)				
		(GMT)	A	в	С	D	A	В	С	D	
2004	9:00	307.4±0.2	307.6±0.4	307.4±0.3	307.1 ± 0.7	0.7±0.2	1.1 ± 0.4	1.3 ± 0.3	1.0 ± 0.7		
2005	9:00	301.6±0.2	302.2 ± 0.3	301.7 ± 0.3	301.4 ± 0.4	2.1 ± 0.2	2.6 ± 0.3	2.1 ± 0.3	1.9 ± 0.4		
	13:00	312.0 ± 1.0	313.0 ± 1.0	312.4 ± 0.9	312.0 ± 1.0	3.0 ± 1.0	4.0 ± 1.0	3.6 ± 0.9	3.0 ± 1.0		

consistent with the measurements conducted in the field. The olive trees under well irrigated treatments showed lower temperature values than trees under deficit irrigation treatments, for the three overflight times (Table 4). Differences between deficit and well irrigated treatments yielded 1 K and 2 K at 12:30 GMT in 2004 and 2005, respectively. Tc–Ta yielded 3 K and 4 K for the trees under deficit irrigation treatment S1 at 12:30 GMT in 2004 and 2005, respectively, while trees under well irrigated treatment maintained 2 K difference (Table 4). Similarly, for the peach orchard temperature differences between extreme irrigation



Fig. 7. Relationships between Tc–Ta (K) obtained with the AHS imagery and stomatal conductance (GI) for olive trees. The relationship is for individual trees: a) at 7:30 GMT, e) at 9:30 GMT, and e) at 12:30 GMT; and for plots comprising 12 trees across 3 crop lines under the same irrigation level: b) at 7:30 GMT, d) at 9:30 GMT, and f) at 12:30 GMT.

treatments (B and D) yielded 1 K at 13:00 GMT in 2005, and Tc– Ta was 4 K for the B treatment and 3 K for D treatment (Table 5). These results demonstrate that airbome thermal imagery at highspatial resolution is able to detect differences in tree crown temperature associated with irrigation levels, even within the range of variation of commercial irrigation doses applied in the peach orchard.

The assessment of the relationship between remote sensingestimated crown tree temperature and field-measured stomatal conductance (GI) and stem water potential (SWP) was specifically conducted on the olive tree orchard in the 2005 campaign at each of the three overflight times (water potential and conductance were measured on trees at each flight time). Fig. 7 shows the relationships between crown Tc–Ta, with Tc obtained with the airborne AHS thermal imagery, and the GI measured in the field at 7:30 GMT (a, b), 9:30 GMT (c, d), and 12:30 GMT (c, f). The assessment was conducted for individual trees (Fig. 7a, c, e) and for experimental plots (12 trees) under the same irrigation treatment (Fig. 7b, d, f). Results yielded determination coefficients r^2 =0.59 (7:30 GMT), r^2 =0.57 (9:30 GMT), and r^2 =0.60 (12:30 GMT) for individual trees; and determination coefficients of r^2 =0.87 (7:30 GMT), r^2 =0.83



Fig. 8. Relationships between Te-Ta obtained with the AHS imagery and stem water potential (SWP) measured in olive trees. For individual trees: a) at 7:30 GMT, e) at 9:30 GMT, and e) at 12:30 GMT and for plots comprising 12 trees across 3 erop lines under the same irrigation level: b) at 7:30 GMT, d) at 9:30 GMT, and f) at 12:30 GMT.

198

(9:30 GMT), and r^2 =0.77 (12:30 GMT) for plots. Moreover, Fig. 8 shows the relationships obtained between SWP and Tc– Ta at each flight time. Determination coefficients yielded r^2 =0.35 (7:30 GMT), r^2 =0.4 (9:30 GMT), and r^2 =0.49 (12:30 GMT) for individual trees; and r^2 =0.39 (7:30 GMT), r^2 =0.51 (9:30 GMT) and r^2 =0.52 (12:30 GMT) for plots of 12 trees under the same irrigation treatment.

Analogously, Fig. 9 displays the results for the peach orchard, showing the relationships obtained between SWP and airborne remote sensing Tc-Ta estimated from the AHS imagery for individual trees (Fig. 9a, c, e) and for each irrigation treatment (Fig. 9b, d, f) for 2004 (a, b) and 2005 (c, d, e, f) campaigns. Results indicated the successful detection of water stress induced from orchard irrigation levels by airborne thermal imagery, obtaining determination coefficients between SWP and Tc–Ta of r^2 =0.81 (9:00 GMT) in 2004, and r^2 =0.75 (9:00 GMT) in 2005, for irrigation treatments. These results are consistent with those obtained for olive trees showing the capability of detecting orchard water stress as function of canopy temperature, even in the case of the peach orchard irrigated under commercial levels. The largest temperature differences among irrigation treatments for olive trees were obtained at 12:30 GMT image.

In order to study the feasibility of using medium resolution satellite sensors such as ASTER for water stress detection in open-tree canopies, a simulation of the ASTER sensor characteristics was conducted. The results of simulating the spectral characteristics of the ASTER sensor, aggregating crown, soil and shadow components at the treatment level $(15 \times 20 \text{ m}^2)$



Fig. 9. Relationships between Tc-Ta values for peach trees estimated from the AHS imagery and stem water potential (SWP), for individual trees: a) at 9:00 GMT obtained in 2005, and e) at 13:00 GMT obtained in 2005; and for irrigation treatments: b) at 9:00 GMT obtained in 2004, d) at 9:00 GMT obtained in 2005.

spatial resolution due to the experimental design) are showed in the Fig. 10. Fig. 10 (a, c, and e) show the relationship between the land surface temperatures for treatment blocks of $15 \times 20 \text{ m}^2$ obtained by the AHS sensor and simulated for the spectral characteristics of the ASTER sensor. The determination coefficients obtained were higher than $r^2=0.90$ at the three overflight times, yielding RMSE lower than 1 K (RMSE=0.04 at 9:30, RMSE=0.98 at 11:30 and RMSE=0.06 at 12:30

GMT). Fig. 10 (b, d, f) show the relationship obtained between the ASTER simulated canopy minus air temperature and SWP aggregated for the trees under the treatment block. The determination coefficients obtained were: $r^2=0.54$ (7:30 GMT) and $r^2=0.58$ (12:30 GMT). As compared with results obtained from AHS for treatment blocks between Tc–Ta and SWP (Fig. 8b, f), the determination coefficients were maintained in the ASTER simulation when the pixels were aggregated of pare crowns, soil



Fig. 10. Relationship between surface temperature of the 15 × 20 m² irrigation treatment blocks, obtained with the AHS sensor and simulated for the ASTER sensor characteristics: a) at 7:30 GMT, e) at 9:30 GMT and e) at 12:30 GMT. Relationships between Te–Ta simulated for the ASTER characteristics and stem water potential: b) at 7:30 GMT, d) at 9:30 GMT, and f) at 12:30 GMT.

200
G. Sepulcre-Cantó et al. / Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

and shadows. These results suggest a potential application of these methods for water stress detection in open crop canopies with medium resolution sensors, showing that the small temperature differences as function of water stressed are not removed due to the soil and shadow effects in these open canopies. Although there was a mean temperature difference between vegetation (tree crowns) and sunlit soil of 11 K at 9:30 and 23 K at 12:30 (Table 6), the background temperature within each experimental plot was similar for all treatment plots due to the uniformity of the orchard soil and its management.

Finally, maps of the Tc–Ta difference were obtained for the peach tree orchard at two overflight times in 2005 (Fig. 11). The spatial distribution of the effects of the water stress in the canopy temperature in the orchard can be observed, as well as the temporal variation over the course of the day. It can be noticed how while most of the canopy did not surpass 2 K for Tc–Ta at 9:00 GMT, most of the canopy exceeded 5 K at 13:00 GMT. These maps of the spatial distribution of the water stress as function of canopy temperature in orchards may be very useful in the irrigation management using remote sensing imagery.

3.3. Remote sensing thermal imagery as an indicator of crop yield and fruit quality

The successful detection of water stress as function of irrigation levels in both the experimental olive field and the commercial peach orchard enabled the assessment of the orchard spatial variability and mapping of potential indicators of yield and some quality parameters. If irrigation doses affect some fruit quality parameters, remote-sensing estimates of thermal crown status should provide a tool for mapping within-field areas of potential homogeneous quality parameters at the tree scale. Such assessment was conducted with field-measured yield and fruit quality parameters from both olive and peach orchards. Table 7 shows the determination coefficients obtained

Table 7 shows the determination coefficients obtained between remote sensing imagery Tc–Ta and yield and quality parameters in olive, such as olive yield, oil content (over dry fruit weight), fruit water content, oil yield and fruit fresh weight, in 2004 and 2005 campaigns. These relationships were obtained for plots of 12 trees under the same irrigation treatment (16 plots, four per treatment) and for the mean values of the different irrigation treatments, at the three overflight times (Table 7). Determination coefficients obtained per irrigation treatments for some olive quality parameters suggested a consistent relationship with water stress detected with thermal imagery: r^2 =0.95 and r^2 =0.89 for fruit water content, and r^2 =0.91 and r^2 =0.92 for fruit fresh weight, for 2004 and 2005

Table 6 Mean temperatures obtained for pure vegetation, sunlit soil and shadows in the olive trees study site for each image collected on 16 July 2005

	Vegetation temperature (K)	Sunlit soil temperature (K)	Shadow temperature (K)
7:30 GMT	300.0 ± 0.5	304.5±0.6	300.7±0.9
9:30 GMT	304.0 ± 1.3	315.0 ± 3.0	305.4 ± 1.4
12:30 GMT	313.3 ± 1.3	336.3 ± 1.7	324.0 ± 4.0



Fig. 11. Maps of the Te–Ta difference of the peach orchard for the two overflight times in 2005: a) at 9:00 GMT, and b) at 13:00 GMT.

respectively. Table 7 shows worse relationships between Tc-Ta and yield and quality parameters for 2005 season. This can be explained by the alternate bearing habit of the olive trees, being 2005 an "off" year with 30% of the yield obtained in 2004.

Similarly, Tc–Ta difference obtained from the AHS imagery (on 25 July 2004 and on 16 July 2005) was related with yield and some fruit quality parameters in peach trees. The assessment was conducted for data obtained in 2004 and 2005 (Table 8). Determination coefficients obtained per irrigation treatments from 2004 and 2005 campaigns also suggest the potential relationship between tree water stress detection with thermal imagery and peach quality indicators: $r^2=0.94$ and 0.77 for fruit mean diameter, $r^2=0.82$ and 0.81 for fruit weight, and $r^2=0.90$ and 0.83 for TSS content, for 2004 and 2005 G. Sepulcre-Cantó et al. / Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

	7	Olive yield (kg tree ¹)	Water content (%)	Oil content (%, per dry weight)	Oil yield (kg tree ¹)	Fruit weight (g
Te-Ta (2004)	Plots 9:30 (n=16)	0.31	0.33	-	-	2
	Treatments 9:30 (n=4)	0.84	0.83	0.80	-	-
	Plots 11:30 (n=16)	0.39	0.69	-	5 10 ()	0.53
	Treatments 11:30 (n=4)	0.77	0.95	-	-	0.91
	Plots 14:30 (n=16)	-	0.51	-	-	0.46
	Treatments 14:30 (n=4)	-	-	0.80	-	-
Tc-Ta (2005)	Plots 9:30 (n=16)	-	-	-	-	-
	Treatments 9:30 (n=4)	-	1. The second	-	-	0.77
	Plots 11:30 (n=16)	-		_	-	-
	Treatments 11:30 (n=4)	-	(m)	-	-	0.92
	Plots 14:30 (n=16)	-	-	-	-	-
	Treatments 14:30 (n=4)	-	0.89	2	0.87	-

– No significant determination coefficients at p < 0.05. The imagery was taken on 25 July 2004 and 16 July 2005 at three times (9:30, 11:30 and 14:30 GMT).

Even though it is far fetched to estimate fruit quality parameters from simple relationships, our results suggest that high resolution thermal remote sensing can be used to infer some fruit quality parameters, as function of the water stress that can be detected at the single tree level. A single remote sensing image collected before harvest may provide useful information about tree water status in the orchard, and be used as an indicator for yield and fruit quality forecasting of the trees as affected by irrigation.

4. Summary and conclusions

This study extends the results obtained in a previous water stress study conducted in olive trees (Sepulcre-Cantó et al., 2006) demonstrating that: i) remote sensing detection of mild water stress in a commercial peach orchard is feasible over treatments under deficit irrigation; and ii) there is potential for the application of thermal remote sensing as an indicator of some fruit quality parameters in open-canopy orchards. Results of the 2004 and 2005 field campaigns showed that canopy temperature, stem water potential and stomatal conductance varied with the irrigation treatments applied to olive and peach trees. Infrared thermal sensors and thermal cameras were able to detect the temperature differences induced by water stress, even in the peach orchard, where only limited irrigation deficits were applied to avoid yield losses. In the olive trees, Tc-Ta yielded 6 K for trees under deficit irrigation and 5 K for trees under well irrigated treatment, while in the peach trees, Tc-Ta yielded up to 4 K for trees under deficit irrigation and 3 K for well irrigated trees in mid September, 2005. Field measurements with the thermal camera showed greater thermal homogeneity for the crown temperature in well-watered trees, obtaining a determi-nation coefficient of $r^2 = 0.48$ between standard deviation of the imagery and the stem water potential. Results obtained from the AHS imagery showed at midday on 16 July 2005 differences in Tc-Ta between fully irrigated and stressed of 2 K for olive trees and 1 K for peach trees. These results show that AHS sensor was able to detect thermal differences between olive and peach trees under different deficit irrigation treatments. Determination coefficients between crown Tc-Ta obtained with the airborne AHS thermal imagery and olive tree stomatal conductance and stem water potential yielded r^2 =0.60 (12:30 GMT) and $r^2 = 0.49$ (12:30 GMT) respectively, in 2005 for individual trees. These results suggest that temperature differences ob-served in trees under different irrigation treatments were due to water stress. Results on the peach orchard also showed successful detection of water stress as a function of mild water deficits imposed by different irrigation levels that were aimed at maintaining full commercial productivity. The determination coefficients between Tc-Ta obtained from the AHS imagery and stem water potential yielded $r^2=0.81$ (9:00 GMT). The results between the ASTER-simulated canopy minus air temperature

Table 8

Determination coefficients (r ²) for the relationships between canopy minus air temperature (Tc-Ta) and yield and some quality parameters in peach, obtaine	d for plots
under different irrigation treatments and for irrigation treatments obtained in 2004 and 2005 campaigns	

	2	Number of fruits per tree	Yield (kg tree 1)	Diameter (mm)	Fruit weight (g)	Soluble solids content (%)
Te-Ta (2004)	Plots (n=16)	0.34	0.32	0.24	-	-
	Treatments (n=4)	-	-	0.94	0.82	0.90
Te-Ta (2005)	Plots (n=16)	-	0.33	0.41	0.44	0.43
	Treatments $(n=4)$	-	-	0.77	0.81	0.83

- No significant determination coefficients at p<0.05. The imagery was collected on 25 July 2004 and 16 July 2005 at 9:00 GMT.

202

468 T.1.1. 7

G. Sepulcre-Canto et al. / Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

and stem water potential aggregated for the peach trees under the treatment block yielded $r^2=0.58$ (12:30 GMT). These results offer hope for applying these methods to ASTER satellite observations for global monitoring of open crop canopies.

This study focused on the potential of thermal remote sensing detection as a tool to quantify tree-level water stress and its relation to yield and fruit quality in olive and peach orchards. Determination coefficients for yield and some olive and peach quality parameters suggested a consistent relationship with remote sensing detected water stress, yielding $r^2=0.95$ (olive fruit water content) and $r^2=0.94$ (peach fruit mean diameter), at the treatment level. These results suggest that high resolution thermal remote sensing has potential as an indicator of yield and of some quality fruit parameters as affected by water stress that can be detected remotely at the single tree level. Maps of Tc-Ta could be used to assess the level of water deficits over orchards and to predict its impact on yield and fruit quality.

Acknowledgements

Financial support from the Spanish Ministry of Science and Education (MEC) for the projects AGL2003-01468, AGL2005-04049 and CONSOLIDER CSD2006-67 is gratefully acknowledged, as well as the support of grant from INIA (RTA02-070), DIMAS (INCO-CT-2004-509087) and CSIC (PIF-200440-F035). C. Ruz, J. Fortea, A. Gillespie, L. Balick and the GCU members M. Zaragoza, G. Soria, M. Romaguera and J. Cuenca are acknowledged for measurements and technical support in the field campaign. F. Villalobos, O. Pérez-Priego, L. Testi and I. Calatrava are acknowledged for scientific and technical support.

References

- Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 847–859.
- Remote Sensing, 21(5), 847–859.
 Acevedo, E., Fereres, E., Hsiao, T., & Henderson, D. (1979). Diurnal growth trends, varter potential, and osmotic adjustment of maize and sorghum leaves in the field. *Plant Physiology*, 64, 476–480.

- Clawson, K. L., & Blad, B. L. (1982). Infrared thermometry for scheduling irrigation of com. Agronomy Journal, 74, 311–316.
 Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf potential by thermal imagery and spatial analysis. Journal of Experimental Botany, 56, 1843–1852.
 Cowan, I. R. (1965). Transport of water in the soil-plant-atmosphere system.
- Corran, J. K. (1902). Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. Journal of Applied Ecology, 2, 221–239.
 Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data. Theory and practice current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2563–2594.
- Detar, W.R., Penner, J. V., & Funk, H. A. (2006). Airborne ret Water stress in fall canopy color. Transactions of the ASAE, 19(3), 655–665.
 Fererse, E., Golhamer, D. A., & Parsons, L. R. (2003). Irrigation water management of horticultural crops. Historical review compiled for the American Society of Horticultural Science's 100th Anniversary. Horticul-
- tural Science, 38(5), 1036-1042.
- Fereres, E., & Soriano, A. (in press). Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. Journal of Experimental Botany. doi:10.1093/jxb/erl165

- Gao, B. C. (1996), NDWI a normalized difference water index for remote sensin n liquid water from space. Remote Sensing of Environm nent, 58, of vege
- Gao, B. C., & Goetz, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness
- Gao, B. C., & Goetz, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. Remote Sensing of Environment, 52, 155–162. Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunan, T., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Space-bome Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56, 1113–1126. Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Alegre, S., Rufat, J., & Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit trigation regimes under shallow soils. Journal of the American Society for Horticultural Science, 128(3), 432–440.
- Harris, A., Bryant, R. G., & Baird, A. J. (2005). Detecting near-surface moisture
- stress in Sphagnum syp. Remote Sensing of Environment, 97, 371–381.
 Hidago, F. J., & Zamora, R. (2003). Edible oil analysis by high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy: Recent advances and future perspectives. Trends in Food Science & Technology, 14, 499–506. Hsiz
- o, T. C. (1973). Plant responses to water stress. Annual Review of Plant
- Physiology, 24, 519-500.Hain Depotence to mark access Annual (Certicol of Lann Physiology, 24, 519-500.Hsiao, T. (1990). Fisiología General. Vol. 1. In Curso Internacional Manejo de Agua en Frutales. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencia Agronómicas, Veterinarias y Forestales, Departamento de Ingeniería Agricola, Chillán, Chile. Hsiao, T. C., Acevedo, E., Fereres, E., & Henderson, D. W. (1976). Stress

- Hsiao, T. C., Acevedo, E., Fereres, E., & Henderson, D. W. (1976). Stress metabolism. Water stress: growth and osmotic adjustment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B*, 273, 479–500.
 Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural and Forest Meteorology*, 24, 45–55.
 Idso, S. B., Jackson, R. D., & Reginato, R. J. (1978). Extending the "degree day" concept of phenomenological development to include water stress effects. *Ecology*, 59, 431–433.
 Dekson, R. D. (dos, S. R., Berinato, R. J. & Pinter, F. P. J. (1981). Canony
- Ecology, 59, 451–455.
 Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr., P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research, 17, 1220 2016. 1133-1138
- son, R. D., & Pinter Jr., P. J. (1981). Detection of water stress in wheat by sensurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. Spectral signatures of objects in remote sensing (pp. 399-406). Versailles, France:
- agnatures of objects in remote sensing (pp. 599–400). Versaules, France: Institut National de la Recherche Agronomique. Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651–656. Jang, J. D., Viau, A. A., & Anctil, F. (2006). Thermal-water stress index from satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1619–1639. 1619-1639
- 1619–1639.
 Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P., Nerry, F., & Ottlé, C. (2004). Land surface temperature retrieval techniques and applications: Case of AVHER. In D. A. Quattrochi, & J. C. Luvall (Eds.), Thermal remote sensingLand Surface Processes. (pp. 33–109) Florida, USA: CRC Press.
 Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). Water relations of plants and soils. San Diego, CA, USA: Academic Press.
 Leinonen, I., & Jones, H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for stimulating cancoy temperature and identifying plant stress. Journal of
- stimulating canopy temperature and identifying plant stress. Journal of
- stimulating europy temperature and identifying plant stress. Journal of Experimental Botany, 55, 1423–1431.
 Mitchell, P. D., & Chalmers, D. J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. Journal of the American Society for Horricultural Science, 107, 853–856.
 Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water
- oran, M. S., Ciarke, I. K., Inoue, Y., & Viai, A. (1999). Issumating oray water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 46, 246–263. oriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., & Ferrers, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horizoitanian Science*, 128(3), 425–431. Mori
- Peñuelas, J., Fiella, I., Biel, C., Serrano, L., & Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. International Journal of Remote Sensing, 14, 1887–1905.

470

G. Sepulcre-Cantó et al. / Remote Sensing of Environment 107 (2007) 455-470

- Peñuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., & Fiella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900 /R970). Interna-tional Journal of Remote Sensing, 18, 2869–2875.
 Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., & Hoshizaki, T. (1986). Remote detection of forest damage. Bioscience, 36, 439–445.
- 439-445.
 Sepulere-Cantó, G., Zarco-Tejada, P. J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., de Miguel, E., & Villalobos, F. J. (2006). Within-field thermal variability detection as function of water stress in *Olea europaea* L. orchards with high spatial remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31-44.
- Serrano, L., Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, G. A., & Penuelas, J. (2000).
- Serrano, L., Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, G. A., & Penuelas, J. (2000). Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 74, 570–581.
 Stackel, K. A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., et al. (1997). Plant waterstatus as an index of irrigation need in decidious fruit trees. *HorTechnology*, 7, 23–29.
 Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Zarco-Tejada, P. J., Sepulere-Camtó, G., & de Miguel, E. (2006). Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 102, 99–115.
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Soria, G., & Jiménez, J. C. (2002). Land surface temperature

- Sohrino, J. A., Li, Z. L., Soria, G., & Jiménez, J. C. (2002). Land surface temperature and emissivity retrieval from remote sensing data. Recent Research Developments on Geophysica, 4, 21–44.
 Stimson, H., Breshears, D., Ustin, S., & Kefauver, S. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring confifer species: Phune adults and Junispers monosperma. Remote Sensing of Environment, 96, 108–118.
 Uriu, K., & Magness, J. R. (1967). Deciduous tree firsts and nats. In R. M. Hagan, H. R. Haise, & T. W. Edminster (Eds.), Drigotion of agricultural land-sdhonograph, Fol. 11. Madison, WI: American Society of Agronomy.
 Ustin, S. L., Roberts, D. A., Finzon, J., Jacquennoud, S., Gardner, M., Scheer, G., et al. (1998). Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. Remote Sensing of Environment, 55, 280–291.
 Wanjurn, D. F., Maas, S. C., Winslow, D. R., & Upchurch, D. R. (2004). Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 33–48.
 Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tis, H., Kawakami, T., & Phiel, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Renote Sensing, 36(4), 1062–1071.
- (ASTER). IEEE Intrinsitions on version and the intervention of the intervention of

Anexo III

Anexo III



Remote Sensing Environment

www.elsevier.com/locate/rs

Remote Sensing of Environment 102 (2006) 99-115

Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data

> José A. Sobrino ^{a,*}, Juan C. Jiménez-Muñoz ^a, Pablo J. Zarco-Tejada ^b, Guadalupe Sepulcre-Cantó ^b, Eduardo de Miguel ^c

^a Global Change Unit, Department of Thermodynamics, Faculty of Physics, University of Valencia, Valencia, Spain ^b Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Córdoba, Spain ^c Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Dpto. de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera, Madrid, Spain Received 24 October 2005; received in revised form 30 January 2006; accepted 1 February 2006

Abstract

The AHS (airborne hyperspectral scanner) instrument has 80 spectral bands covering the visible and near infrared (VNIR), short wave infrared (SWIR), mid-infrared (MIR), and thermal infrared (TIR) spectral range. The instrument is operated by Instituto Nacional de Técnica Aerospacial (INTA) and it has been involved in several field campaigns since 2004. The main goal of this paper is to analyze the feasibility of retrieving land surface temperature from the 10 AHS thermal infrared bands, from 71 to 80, located in the region between 8 and 13 μ m. For this purpose, three different methods have been considered: (i) the single-channel method, which uses only one thermal band; iii (i) the split-window method, which uses a combination of two thermal bands; and (iii) the TES (temperature and emissivity separation) method, which needs at least four thermal bands. The calibration of the AHS thermal bands and the algorithms have been tested with in situ measurements collected in the framework of the SPARC (Spectra Barrax Campaign) and EAGLE (Exploitation of AnGular effects in Land surface beservations from satellites) field campaigns, which took place simultaneously in the agricultural area of Barrax (Albacete, Spain), and also in the framework of the AGRISPECTRA field campaign, carried out over an olive orchard in Córdoba (Spain), in July 2004. AHS flights were conducted at two different altitudes, 975m and 2745m above ground level. The results show that AHS bands 71 (8.18 μ m), 72 (8.66 μ m), and 73 (9.15 μ m) were affected by a calibration problem. Taking into account that AHS bands 74 (9.60 μ m) and 80 (12.93 μ m) are located in an absorption region, bands from 75 to 79 have been finally selected for land surface temperature retrieval. The single-channel method has been applied to AHS band 75 (10.07 μ m), which shows the highest atmospheric transmissivity, whereas the split-window method has been applied to the combination between bands 75 and 79 (12.35 μ m), which provides the best results according to simul

Keywords: Airborne hyperspectral scanner; Visible and near infrared; Spectral band

1. Introduction

Although remote sensing is recognized as a powerful tool in the collection, analysis, and modeling of environmental data, less attention has been given to the use of thermal infrared (TIR) remote sensing. With the launch of the NASA Terra suite of

0034-4257/S - see front matter ${\odot}$ 2006 Elsevier Inc. All rights reserved, doi:10.1016/j.rse.2006.02.001

Earth remote sensing instruments in 1999, which included TIR sensors, thermal data are poised to become a major source of quantitative and qualitative information on land surface processes and for their characterization, analysis, and modelling (Quattrochi & Luvall, 2004). There are two fundamental reasons why TIR data contribute to an improved understanding of land surface processes: (i) through measurement of surface temperatures as related to specific landscape and biophysical components and (ii) through relating surface temperatures with energy fluxes for specific landscape phenomena or processes

^{*} Corresponding author. Dr Moliner 50-46100 Burjassot, Valencia, Spain. Tel./fax: +34 96 354 31 15. *E-mail address:* sobrino@uv.es (J.A. Sobrino).

(Quattrochi & Luvall, 1999). Different thematic areas where TIR remote sensing data have been applied to the analysis of landscape attributes or land surface processes could be found, as for example: (i) landscape characterization, (ii) thermal intertia and landscape analysis, (iii) estimation of energy fluxes, (iv) evaporation/evapotranspiration/soil moisture, (v) quantification of energy balance or energy flux, and (vi) forest energy exchance.

In all these thematic areas and other environmental studies, land surface temperature (LST) is a key parameter which can be retrieved from TIR data. Hence, except for solar irradiance components, most of the fluxes at the surface/atmosphere interface can only be parameterized through the use of surface temperature. LST can play either a direct role, such as when estimating long wave fluxes, or indirectly as when estimating latent and sensible heat fluxes (Kerr et al., 2004). LST can be also used as an input data in water and energy balance studies, which is an important issue in environmental studies in order to achieve a better understanding on the exchange of heat and moisture between the land surface and lower atmosphere, also leading to a better understanding on the water and carbon cycles. Moreover, many other applications rely on the knowledge of LST, such as geology, hydrology, vegetation monitoring, global circulation models, and evapotranspiration, among others.

Different approaches have been published in the last years in order to retrieve LST from satellite data. However, most of these approaches have been developed for low spectral resolution sensors, with only one or two thermal bands, as the Thematic Mapper (TM) onboard the LANDSAT platform, the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) onboard the NOAA series, the Along Track Scanning Radiometer (ATSR) onboard ERS-1 and ERS-2 platforms, and the most recent Advanced ATSR (AATSR) onboard the ENVISAT platform. Among these methods, we highlight the *single-channel* and two-channel or split-window algorithms, which will be described below. Different spectral and spatial resolution sensors are currently available, with several thermal bands as the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), and the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) onboard Terra (or also AQUA for MODIS) satellite, or the SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) onboard the MSG-1 (Meteosat Second Generation). Airborne sensors available are the digital airborne imaging spectrometer (DAIS), the airborne hyperspectral scanner (AHS), or the airborne reflective/emissive spectrometer (ARES), among others. Despite the methods developed for low resolution sensors that can be adapted to high resolution data new methods have been developed in order to retrieve LST from multispectral thermal data, as the TES method (Gillespie et al., 1998).

The purpose of this paper is to analyze the feasibility of retrieving LST from AHS thermal infrared data as well as the accuracy obtained depending on the number of thermal bands used on the LST retrieval. The paper is organized as follows: in Section 2, we describe the methods used in this study for LST retrieval; in Section 3, we present the field campaigns and ground-based measurements; and in Section 4, we describe the AHS sensor. The results obtained are shown in Section 5, which includes the analysis of the calibration of the AHS thermal bands and the tests and validation conducted on the algorithms. Finally, we present the conclusions drawn in this study.

2. Methods for LST retrieval

Different methods or techniques have been proposed in the last years in order to retrieved LST from thermal infrared data. A review of methods can be found in Sobrino et al. (2002), Dash et al. (2002), and Kerr et al. (2004). Basically, these methods could be classified as (i) single-channel methods, which used only one thermal band; (ii) two-channel or split-window methods, which use a combination between two thermal bands; and (iii) two-angle methods, which use one thermal band and two view angles. There are also other methods, which use more than two thermal bands or based on other techniques (see for example Becker & Li, 1990a; Sun & Pinker, 2003; Wan & Li, 1997). The availability of sensors with multispectral capabilities in the thermal infrared region has also favoured the development of methods for LST retrievals, which use several thermal bands, as the temperature and emissivity separation (TES) method, developed by Gillespie et al. (1998), which also provides surface emissivities jointly with the temperature. In order to retrieve LST from AHS data, we considered the singlechannel, two-channel, and TES methods, which are widely used by the scientific community and described below.

2.1. Theoretical background

Methods for LST retrieval based on the radiative transfer equation, which can be written in the thermal infrared region for a certain sensor band *i* as:

$$L_i(T_i) = L_i^{LLR} \tau_i + L_i^{\dagger}$$
(1)

where $L_i(T_i)$ is the radiance measured by the sensor $(T_i$ is the atsensor brightness temperature), τ_i is the atmospheric transmissivity, and L_i^{\dagger} is the up-welling path radiance. The term L^{LLR} is the land-leaving radiance (LLR) or radiance measured at ground-level, which is given by:

$$L_i^{\text{LLR}} = \varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i) \frac{F_i^4}{2} \qquad (2)$$

where ε_i is the surface emissivity, $B_i(T_s)$ is the Planck radiance at surface temperature T_{s} , and F_i^1 is the down-welling sky irradiance. In Eq. (2), the assumption of Lambertian behaviour for the surface has been considered in order to express the reflection term as $(1-\varepsilon)\pi^{-1}F^1$. The magnitudes involved in Eqs. (1) and (2) are band averaged values using the spectral response functions.

2.2. Single-channel method

Single-channel methods retrieve LST only from one thermal band. Different single-channel algorithms can be found in the

208

(3)

literature (see for example Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003; Qin et al., 2001). In this paper, we propose a single-channel algorithm based on the solving for the Planck radiance according to Eqs. (1) and (2):

$$B_i(T_s) = \frac{L_i(T_i) - L_i^{\dagger}}{\varepsilon_i \tau_i} - \frac{(1 - \varepsilon_i)F_i^{\downarrow}/\pi}{\varepsilon_i}$$

LST can be finally retrieved by inversion of the Planck's law:

$$T_{\rm s} = \frac{c_2}{\lambda_f} \left[\ln \left(\frac{c_1}{\lambda_i^2 B_i} + 1 \right) \right]^{-1} \tag{4}$$

where B_i is given by Eq. (3), and c_1 and c_2 are the constants in the Planck's function $(c_1=1.19104 \times 10^8 \text{ W} \ \mu\text{m}^4 \text{m}^2 \text{ sr}^1$ and $c_2=14387.7 \ \mu\text{m}$ K). In this method, the surface emissivity ε_i is assumed to be known. Assuming that atmospheric water vapour is the primary factor controlling the magnitude of atmospheric transmittance, the hemispheric down-welling radiance and upwelling atmospheric radiance for a given band, different approaches can be proposed in order to related these atmospheric parameters with the atmospheric water vapour, which is a more easily accessible parameter. The results obtained will be shown in Section 3. This procedure has been applied to high resolution data by Jiménez-Muñoz and Sobrino (2005), providing good results (root mean square errors RMSE <1.8K) for atmospheres with low water vapour content and using the thermal band for which the atmospheric transmissivity is higher.

2.3. Two-channel algorithms

The basis of the two-channel technique (or split-window when it is applied in the region 10–12.5 µm) is that the atmospheric attenuation suffered by the surface emitted radiance is proportional to the difference between the at-sensor radiances measured simultaneously in two different thermal channels (McMillin, 1975). Many papers have used this technique to extract sea surface temperature (Deschamps & Phulpin, 1980; McClain et al., 1985; Sobrino et al., 1993a, etc.) and land surface temperature (Becker & Li, 1990b; Prata, 1993; Price, 1984; Sobrino et al., 1991, 1994, etc.). In this paper, the two-channel algorithm proposed by Sobrino and Raissouni (2000) has been used, which takes into account the emissivity and water vapour effects:

$$T_{s} = T_{i} + a_{1}(T_{i} - T_{j}) + a_{2}(T_{i} - T_{j})^{2} + a_{0} + (a_{3} + a_{4}w)(1 - \varepsilon) + (a_{5} + a_{6}w)\Delta\varepsilon$$
(5)

where T_s is the surface temperature (in K), T_i and T_j are the atsensor brightness temperatures of the different thermal DAIS channels (in K), $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$ and $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ are the mean effective emissivity and the emissivity difference, w is the total atmospheric water vapour (in g/cm²), and, finally, a_k (k=0 to 6) are the numerical coefficients of the two-channel algorithm. These coefficients can be obtained by means of a simulation procedure, which will be described in Section 3. 2.4. TES method

The TES (temperature and emissivity separation) method estimates land surface emissivity ε_i and temperature T_a from multispectral thermal data. The TES algorithm is described in detail in Gillespie et al. (1998), so a detailed description of the method will not be given here. It is based on the radiative transfer equation (see Eqs. (1) and (2)) applied to each thermal band and it is composed by three modules (NEM, RATIO, and MMD). The method uses atmospherically corrected data (landleaving radiance and down-welling atmospheric irradiances) and a semi-empirical relation determined from laboratory spectra, between the minimum difference, MMD). The semi-empirical relation between ε_{min} and MMD has been originally calculated for the ASTER sensor onboard the Terra platform, with five thermal bands in the region between 8 and 12 μ m. Using 86 laboratory spectra, Gillespie et al. (1998) found the following simple power law:

$$min = 0.994 - 0.687 MMD^{0.737}$$
(6)

with a correlation coefficient squared of R^2 =0.983 and 95% of the samples falling within ±0.02 emissivity units. Once the surface emissivities have been recovered, LST is obtained by inversion of the Planck's law according to Eq. (4) and using the thermal band for which the emissivity is maximum, in order to minimize the effect of the sky irradiance in the reflection term.

3. Field data

Field campaigns are of importance in order to validate or test the algorithms developed for retrieving a certain biogeophysical parameter from satellite or aircraft data. The aircraft images and the in situ data used in order to conduct the study shown in this paper were acquired in the framework of three field campaigns related to three different projects. The SPARC (Spectra Barrax Campaign, http://gpds.uv.se/sparc) and EAGLE (Exploitation of AnGular effects in Land surfacE observations from satellites, http://www.uv.es/ucg/eagle) field campaigns took place simultaneously in the Barrax test site (Albacete, Spain), in 2004. Another field campaign was conducted in 2004 in an olive orchard located in Córdoba (Spain), in the framework of the AGRISPECTRA (Estimation of Leaf and Crop Biophysical Variables in Olive and Vineyard Canopies through Hyperspectral Remote Sensing Methods for Integration with Precision Agriculture) project. The Barrax test site is an agricultural area situated in the West of the province of Albacete, 28km from the capital town (39°3'N, (Moreno et al., 2001). Fig. 1 shows the study area of Barrax from an AHS image acquired on 15 July 2004 at 12:43 UTC, in which the plots where field measurements were carried out are also displayed. The Córdoba site is a 4ha irrigated olive orchard (Olea europaea L. cv. 'Arbequino') located in southern Spain (37.8°N, 4.8°W). A full description of this experimental area be found in Sepulcre-Cantó et al. (in press). Fig. 2 shows the study area from an AHS image acquired on



Model	Bands µm	Range °C	Accuracy °C	FOV°C
CIMEL 312-1	8-13	-80 to 60	0.1	10
	8.2-9.2			
	10.3-11.3			
	11.5-12.5			
CIMEL 312-2	8-13	-80 to 60	0.1	10
	11 - 11.7			
	10.3-11			
	8.9-9.3			
	8.5-8.9			
	8.1-8.5			
EVEREST 3000	8-14	-40 to 100	0.5	4
RAYTEK ST8	8-14	-30 to 100	0.5	8
RAYTEK MID	8-14	-40 to 600	0.5	20

Fig. 1. The study area of Barrax. The image corresponds to AHS band 75 (10.07 $\mu m)$ raw data and it was acquired on 15 July 2004 at 12:43 UTC, with a pixel size of 7m.

25 July 2004 at 9:30 UTC, in which the olive orchard is highlighted.

In the SPARC/EAGLE field campaign, temperature measurements were made using different broadband and multiband field thermal radiometers. Models EVEREST 3000, RAYTEK ST8, and RAYTEK MID correspond to broadband radiometers, whereas models CIMEL CE 312-1 and CIMEL CE 312-2 ASTER are multiband radiometers (they also have a broad band). In addition, two blackbodies (EVEREST 1000 and GALAI 204-P) were used for calibration purposes. Table 1 summarizes the main technical characteristics of the thermal radiometers. Field measurements were made over two plots of bare soil (referred as 'bare soil 1' and 'bare soil 2') and two plots of corn (referred as 'corn 1' and 'corn 2'), one plot of water and one plot of grass (see Fig. 1). Two different techniques were considered in order to measure surface



Fig. 2. The study area of Córdoba. The image has been obtained from the atsensor radiance in AHS band 75 (10.07 µm) and it was acquired on 25 July 2004 at 9:30 UTC, with a pixel size of 2.5 m. temperatures: (i) by means of transects, i.e., measuring while walking along the field, and (ii) by means of fixed measurements by placing the radiometers on poles with an altitude of around 2m.

A total of 10 infrared sensors Apogee model IRTS-P were placed on poles with an altitude of 6m over 10 olive trees in the Cordoba site (AGRISPECTRA project) in order to monitor crown temperature continuously as function of a tree water status gradient obtained through drip irrigation method. Previous to the field installation, the IRT sensors were calibrated in the laboratory and under natural sun conditions to study the IRT response to the diumal temperature variation. Temperature over the course of the day varied between 25° C and 40° C, enabling a comparison between the IRT-estimated temperature and a thermocouple type K (chromel–alumel) in contact with the water target used for calibration. The observed errors agreed with the sensitivity of the instrument (Apogee, www.apogee-inst.com) yielding a deviation of $\pm 0.4^{\circ}$ C breven the 5°C and 40°C range. The 52° field-of-view (FOV) of the IRTS-P sensors placed on the top of each olive tree at 1m distance from the crown enabled the measurement of an integrated canopy temperature for each single tree crown.

4. The AHS sensor

4.1. Technical characteristics

The airborne hyperspectral scanner (AHS) (developed by SensyTech Inc., currently ArgonST, USA) is operated by the Spanish Institute of Aeronaoutics (INTA) and it was placed onboard the aircraft CASA 212-200 Paternina. The AHS sensor is based on the integration of many advanced technologies developed by SenSyTech under R&D contracts over the past few years. While the combination of these components is offered here for the first time, each of the individual items has been delivered and field-tested in operational use. The AHS incorporates advanced components to ensure high performance while maintaining the ruggedness to provide operational specifications and the arrangement of the spectral bands are 80 bands in four ports (VIS, NIR, SWIR, MVIR, and LWIR);

210

4.3. AHS data processing and atmospheric correction

Table 2 AHS the al bands Band FWHM (um) Effective wavelength (µm) 7.95-8.42 8.45-8.84 8.94-9.35 9.38-9.81 8.18 71 72 73 74 75 76 77 78 8.66 9.15 9.60 9.85-10.27 10.31-10.86 10.89-11.45 11.49-12.05 10.07 10.59 11.78 79 80 12.09-12.57 12.35 12.93

FOV: 90° (±45°), IFOV: 2.5 mrad, GFOV: 2–6 m at 140kt cruise speed; scan speed: 6.25, 12.5, 18.75, 25, 31.25, 35 rps; 12 bits digitised; 750 samples per line; black body thermal references (set to 15° C and 55°C). The arrangement of the AHS thermal bands from 71 to 80 is given in Table 2.

4.2. Imagery acquired

During the SPARC/EAGLE campaign, the AHS flights took place in 2 days, 15 July 2004 (flight 1) and 18 July 2004 (flight 2). Flight 1 started at 10:43 UTC and finished at 12:45 UTC. It was composed by 7AHS images acquired at low altitude (975m above ground level—AGL, pixel size 2.5m) and 2AHS images acquired at high altitude (2745m AGL, pixel size 7m). Flight 2 started at 10:30 UTC and finished at 12:20 UTC, also composed by seven images at low altitude and two images at high altitude (same characteristics as flight 1, but different line flights).

1, but different line flights). In the AGRISPECTRA campaign, three AHS images were carried out on 25 July 2004 at different times: 7:30 GMT (flight 1), 9:30 GMT (flight 2), and 12:30 GMT (flight 3). The flights had similar characteristics to the low flights conducted in SPARC/EAGLE, with an altitude of 980m AGL and a pixel size of 2.5 m.

The processing of the AHS imagery included the raw data to radiance transformation and the atmospheric correction. AHS images were processed to at-sensor radiance for the thermal infrared bands (from 71 to 80) using calibration coefficients determined during flight from two blackbody sources which are viewed for every mirror scan. The first (cool) blackbody has been set to 15°C, whereas the second (warm) blackbody had been set to 55°C. This procedure is performed for every thermal band on every scanline. The AHS onboard blackbodies are copper plates covered with a black paint with emissivity greater than 0.99 through the 3 to $14 \mu m$ spectral range (note that this specification permits a bias <0.5 °C in the measured tempera ture), and they subtend 4° when viewed by the radiometer. The performance of the thermal control is not specified by the manufacturer and we have observed some temporal instabilities. So, we use the actual line-by-line blackbody data in the calibration instead of the nominal or average one. As the temporal variations show a low frequency, we have not considered the possible delay in the response of the measuring thermistors as a source of error. Circuitry to monitor the blackbodies temperature (YSI Thermilinear thermistors net-work) is designed to yield better than 0.5° accuracy (including the sensors). The non-linearity effects are limited to ± 0.15 °C

The atmospheric correction of AHS images was performed using the radiative transfer equation given by Eq. (1), from which the land-leaving radiance (L_i^{LLR}) can be obtained from the at-sensor radiance after compensation of atmospheric effects according to:

$$L_i^{\text{LLR}} = \frac{L_i(T_i) - L_i^{\dagger}}{\tau_i}.$$
 (7)

The atmospheric parameters $\tau_6 F_1^{\dagger}$, and L_1^{\dagger} involved in the atmospheric correction were estimated using the MODTRAN 4 radiative transfer code (Berk et al., 1999) and the in situ



Fig. 3. Location of the AHS thermal bands. The plot also shows the atmospheric transmissivity spectrum overlayed with the location of the AHS thermal bands for the low (975m AGL) and high (2745m AGL) flights carried out on 15 July 2004 and also for a typical satellite altitude (700km).

radiosoundings launched almost simultaneously with the AHS overpass. The band values were finally obtained using the filter functions of the AHS thermal bands. These filter functions are shown in Fig. 3 compared to the atmospheric transmissivity for the low flight (975 m AGL), the high flight (2745 m AGL), and a typical satellite altitude (700 km). Bands 71 and 80, located around 8 and 13 μ m, respectively, show the highest atmospheric absorption, whereas bands 75 to 79 are located in the highest atmospheric transmissivity. Band 74 is located in the region of the ozone absorption, but in the AHS flights this absorption is not observed because the maximum absorption of the ozone is usually located at atmospheric altitudes higher than 10 km.

5. Results and analysis

5.1. LST estimation from ground-based measurements

The thermal radiometers described in Section 3 and used at ground-level measure the land-leaving radiance (L^{LLR}) given by

Eq. (2), since at ground-level is assumed that $\pi \approx 1$ and $L^{\dagger} \approx 0$. Surface emissivity values (e) can be measured in situ, for example using the box method (Nerry et al., 1990), or extracted from spectral libraries, as for example the ASTER spectral library (http://speclib.jpl.nasa.gov), whereas F^{1}/π can be approximately measured by pointing with the radiometer to the sky with a near-nadir view or, more accurately, by pointing to the sky with a view angle of 53° measured from the zenith (Kondratyev, 1969). Therefore, from Eq. (2), it is possible to find the value of T_{a} from ground-based measurements and by inversion of the Planck's law. The term 'radiometric temperature' (T_{rad}) is used when Planck's law is inverted using the quantity L^{LLR} , so the difference between the land surface temperature (T_{a}) and the radiometric temperature (T_{rad}) is due to the emissivity (e) and atmospheric effects (F^{+}), both coupled. In order to illustrate the differences between radiometric and

In order to illustrate the differences between radiometric and land surface temperatures and also the problems related with the thermal heterogeneity of the natural surfaces, Fig. 4 shows an example of the T_s and T_{rad} values obtained with the Raytek MID radiometer fixed on the mast between 13:00 and 13:15 LT (local time, GMT=LT-2) the 15th of July in 2004 over bare soil (Fig.



Fig. 4. Radiometric temperature (T_{md}) and surface temperature (T_b) measured with the Raytek MID radiometer located on fixed masts over (a) bare soil and (b) green grass.

212

 (ε_i) , and the LST (T_s) are known. Values of at-sensor brightness temperatures have been compared with the extracted from the AHS images (by selecting boxes of $m \times n$ pixels located around the measurement sites) in order to check the calibration of the AHS sensor. The atmospheric parameters have been extracted from the radiosoundings launched in situ and the MODTRAN 4 code. The emissivity spectra for water and grass have been obtained from the ASTER spectral library, whereas for the com plot a constant value of 0.99 have been assumed due to its high coverage. One sample of soil was collected at the field and sent to the Jet Propulsion Laboratory (JPL) in order to measure its emissivity spectrum. Fig. 6 shows all the emissivity spectra for the AHS thermal bands considered in this study. The analysis is shown for the SPARC/EAGLE campaign, since in the AGRISPECTRA campaign the atmosphere was not characterized. From all the AHS images and ground-based measurements available, only the plots measured simultaneously with the sensor overpass have been selected for checking the calibration of the AHS thermal bands, leading to a total amount of 19 plots acquired over different surfaces (bare soil, grass, corn, and water). The results obtained are shown in Fig. 7 for the high flight (975m AGL) and in Fig. 8 for the low flight. All the graphs shown in these figures have been scaled in steps of 1 K (Y-axis, horizontal lines) for a better comparison of the differences obtained over the different plots and flights According to the results obtained, AHS band 73 (9.15µm) seems to be affected by a calibration problem, because the values obtained with this band do not follow the expected tendency in the shape of the brightness temperatures versus the wavelength. AHS band 71 (8.183 µm) also shows some calibration problems in the low flights (see Fig. 8), whereas band 72 (8.659 µm) seems to show a random behaviour Looking to the different plots considered in this analysis, the results obtained over water provide, in general, the better accordance with the ground-based measurements. It should be noted that the water behaviour is similar to a blackbody, so the

emissivity and reflection terms $(1 - \varepsilon)\pi^{-1}F^{\downarrow}$ involved in Eq. (2) have a minimal contribution. The bare soil plot provides a good shape for the spectrum; however, high differences (>4K) have been found, except for the bare soil observed in the AHS image acquired on 18 July at 11:03 UTC (low flight, Fig. 8). An explanation of the different behaviour of this bare soil and the others could be found in the different radiometers used in the urements. This last bare soil plot was measured with the me CIMEL radiometer, which is the most accurate thermal radiometer. Problems on the ground-based measurements have been also found in the corn plots for the low flight carried out on 18 July at 11:03 UTC (see Fig. 8). Differences when comparing with ground-based measurements higher than 4K have been obtained. The corn plot for the AHS image acquired at 10:50 UTC (also included in Fig. 8) shows ground-based brightness temperatures substantially different to those measured at 11:03 UTC. Taking into account that the corn plot was in a fully covered stage and well irrigated, temperatures between the two consecutive flights should be similar. Significant differences have been found also in some green grass plots. Despite these plots have been labelled as "green", a visual inspection at the field site shows a mixed contribution composed by green and also senescent grass, leading to a less homogeneous plot. Despite these problems, the AHS thermal bands provides good results in comparison with ground-based measurements for the bands located in the split-window region from 10 to 13 µm (AHS bands from 75 to 79).

5.3. Simulated data for single-channel and split-window algorithms

In order to obtain operative algorithms for retrieving LST with single-channel or split-window methods, different atmospheric conditions have been simulated. For this purpose the MODTRAN 4 radiative transfer code (executed in the thermal radiance mode) and a set of 54 radiosoundings extracted from



Fig. 6. Emissivity spectra for different plots. Emissivities for water and grass have been extracted from the ASTER spectral library, whereas the bare soil sample was collected at the field and measured in the Jet Propulsion Laboratory (JPL). A constant value equal to 0.99 has been considered for the corn plot, due to its greenness and high cover.

213



Fig. 7. Comparison between the ground-based and the AHS at-sensor brightness temperature for the high flights (2745 m above ground level) over different surfaces.

the TIGR (TOVS Initial Guess Retrieval) database (Scott & Chedin, 1981) and described in Sobrino et al. (1993b) have been used. In this way, spectral values of the atmospheric parameters τ, F^{1} , and L^{1} have been obtained. These values have been averaged according to the AHS filter functions in order to obtain the effective values for the thermal bands from 75 to 79 (see Eq. (3)). Fig. 3 showed that the highest τ is obtained for AHS band 75. For this reason, band 75 (10.07 μ m) has been chosen as the optimal band for applying the single-channel algorithm given by Eq. (3). The dependence of this algorithm with the atmospheric parameters have been avoided by finding relations with w. Taking into account the set of the 54 radiosoundings mentioned before, the following results have been obtained for the low flight (975 m AGL):

$$\tau_{75} = -0.0505w^2 - 0.0691w + 1.0010$$

$$(R^2 = 0.998, \ \sigma = 0.003)$$

$$L_{75}^{\uparrow} = 0.5638w^2 + 0.4498w - 0.0164$$

$$(R^2 = 0.998, \sigma = 0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$$

 $\begin{aligned} &(R^2 = 0.981, \ \sigma = 0.3 \ W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}) \end{aligned} \tag{10} \\ &\text{and for the high flight (2745 m AGL):} \\ &\tau_{75} = -0.0143 w^2 - 0.0678 w + 1.0006 \\ &(R^2 = 0.997, \ \sigma = 0.007) \end{aligned} \tag{11} \\ &L_{75}^{+} = 0.1531 w^2 + 0.4900 w - 0.0513 \\ &(R^2 = 0.995, \ \sigma = 0.07 \ W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}) \end{aligned}$

 $L_{75}^{\uparrow} = 0.2746w^2 + 3.5473w - 0.2231$

$$\begin{split} L_{75}^{\downarrow} &= 0.0431 w^2 + 1.8217 w + 0.1503 \\ (R^2 &= 0.976, \ \sigma = 0.3 \ \mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{\mu} \mathrm{m}^{-1} \cdot \mathrm{sr}^{-1}) \end{split}$$

where $L^{\downarrow} \equiv F^{\downarrow}/\pi$, R^{2} is the correlation coefficient squared, and σ the standard error of estimation. In order to select the best combination between the bands *i*

(8) In order to select the best combination between the bands i and j involved in the split-window algorithm (see Eq. (16)), the numerical coefficients a_k have been obtained for all the combinations between AHS bands from 75 to 79, and then a

214

108

J.A. Sobrino et al. / Remote Sensing of Environment 102 (2006) 99-115



Fig. 8. Comparison between the ground-based and the AHS at-sensor brightness temperature for the low flights (975 m above ground level) over different surfaces.



sensitivity analysis according to Sobrino et al. (2004) (see Eqs. (10) to (14) in the cited paper) has been carried out in order to estimate the error on the LST retrieved with these algorithms.

At-sensor brightness temperatures for the bands i and j involved in Eq. (5) are simulated using the radiative transfer equation (see Eqs. (1) and (2)), in which atmospheric

109

Table 3 Emissivity spectra extracted from the ASTER spectral library and used in the mulation 1

110

Class	Subclass	Samples
Rocks	Igneous	100
	Metamorphics	76
	Sedimentary	68
Soils	Alfisol	9
	Aridisol	14
	Entisol	10
	Inceptisol	7
	Mollisol	9
Vegetation	Green grass	1
	Dry grass	1
	Conifers	1
	Decideous	1
Water-snow-ice	Water	1
	Ice	1
		Total: 2

parameters are obtained again with the MODTRAN 4 code and the set of 54 radiosoundings. In this simulation, surface emissivity values are also needed. A total amount of 299 emissivity spectra extracted from the ASTER spectral library (http://speclib.jpl.nasa.gov) and averaged according to the AHS filter functions have been used in this simulation. All the All of inter adjecting and or activity and similar and a s conditions over different natural surfaces. With this amount of simulated data, statistical fits are applied in order to recover the numerical coefficients involved in the split-window algorithm. The simulated data is also used in the sensitivity analysis (Eqs. (10) to (14) in Sobrino et al., 2004), in order to obtain the theoretical error of the algorithm over different conditions. The mean value of the error and the standard deviation are used in order to compute the root mean square error (RMSE), assumed to be the final theoretical error of the algorithm. The results obtained are shown in Table 4 for the different flight altitudes and also for a typical satellite altitude. Regarding to the low and high flights, the best combination is obtained with AHS bands 75 $(10.07 \mu m)$ and 79 $(12.35 \mu m)$. When a satellite altitude is considered, the best combination is obtained with AHS bands 76 (10.59 µm) and 79 (12.35 µm), which agrees with typical split-window combinations used in other thermal sensors as NOAA-AVHRR or ENVISAT-AATSR. In all the cases (low, high, and satellite altitude), the error is around $1\,K$. The split-window algorithms with the numerical coefficients for the low and high flight are given in Eqs. (14) and (15), respectively:

$T_s =$	$T_{75} + 0.485(T_{75} - T_{79}) + 0.0068(T_{75} - T_{79})^2$
	$+0.0798 + (47.15 - 10.80W)(1 - \varepsilon)$
	$+(-49.05+21.53w)\Delta\varepsilon$

 $T_{\rm s} = T_{75} + 0.734(T_{75} - T_{79}) + 0.0096(T_{75} - T_{79})^2$ $+0.1198 + (47.46 - 5.20W)(1 - \varepsilon)$

 $+(-61.82 + 14.97w)\Delta\epsilon$

5.4. Simulated data for the TES method: relation &min-MMD and testing

The MMD module included in the TES method uses an empirical relationship between the minimum emissivity (ε_{min}) and the spectral contrast (MMD) in order to recover the surface emissivities (Gillespie et al., 1998). This relationship, initially obtained for the ASTER sensor, needs to be recalculated when other sensors are used. The emissivity spectra (299 samples) described in the previous section have been employed to find the relation between $\epsilon_{\rm min}$ and MMD when AHS bands 75 to 79 are considered. Fig. 9 shows the plot of emin versus MMD for the 299 emissivity spectra of natural surfaces. The following relation has been finally obtained for AHS data:

$$\varepsilon_{\min} = 0.986 - 1.350 \text{MMD}^{1.019}$$
(16)

with a correlation coefficient squared of $R^2\!=\!0.93$ and a standard error of estimation of $\sigma\!=\!0.019.$ It should be noted that the MMD values involved in Eq. (16) have been obtained from AHS bands 75 to 79, located in the 10-12µm region. In theory, Eq. (16) works better when bands located in the $8-10\mu$ m region are also included. AHS bands located in this region (71 to 74) have not been included due to the calibration problems found (Section 5.2). Despite some problems could arise when using only AHS bands 75 to 79 over high MMD surfaces (rocks), accurate results are expected over low MMD surfaces as agricultural areas. AHS images with no calibration problems will require a new computation for the relationship between ε_{min} and MMD.

The TES method has been tested using the simulated data described in the previous section for different flight altitudes: 700 km, 975 m, and 2745 m. The LST retrieved with the method has been compared with the LST included in the simulated data and extracted from the radiosoundings. In all the cases, the TES method provided a RMSE<1.1K.

Table 4

Table 4: Error on the land surface temperature retrieved with the split-window algorithm given in Eq. (5) for different combinations between AHS thermal bands and for different flight altitudes

Band 'i'	Band 'j'	Low flight (975m AGL)	High flight (2745m AGL)	Satellite altitude (700km AGL)	
		Error (K)	Error (K)	Error (K)	
75	76	1.3	1.8	1.6	
75	77	1.2	1.3	1.6	
75	78	1.2	1.1	1.7	
75	79	1.1	1.0	1.6	
76	77	2.2	2.6	3.0	
76	78	1.7	1.6	1.8	
76	79	1.4	1.1	1.2	
77	78	2.4	2.6	3.0	
77	79	1.7	1.5	1.6	
78	79	2.4	23	23	

(15)The minimum error in each case is highlighted.

217

(14)





Fig. 9. Empirical relationship between minimum emissivity (e_{max}) and spectral contrast (MMD) obtained from the emissivity spectra described in Table 3 (R^2 is the correlation coefficient squared and σ is the standard error of estimation).

5.5. Algorithms validation with ground truth data

The algorithms described in the previous sections have been validated using the field measurements carried out in the framework of the different field campaigns. Single-channel and two-channel methods have been tested in the framework of the SPARC/EAGLE and AGRISPECTRA field campaigns. In the SPARC/EAGLE campaign, a total amount of 17 plots composed by water, grass, bare soil, and corn have been used, whereas in the AGRISPECTRA campaign a total amount of 30 plots have been used (10 trees per flight). In order to apply the TES method, an accurate estimation of the atmospheric parameters is needed, since it uses atmospherically corrected data. In the SPARC/EAGLE campaign, different radiosoundings were launched almost simultaneously with the sensor overpass. However, in the AGRISPECTRA campaign, radiosounding data or atmospheric characterizations were not available, so TES method has been only tested in the framework of the SPARC/EAGLE campaign. The values of atmospheric water vapour content needed in order to apply the singlechannel and split-window algorithms are given in Table 5. These values have been obtained using the radiosoundings launched in situ in the framework of the SPARC/EAGLE campaigns and the MODTRAN 4 radiative transfer code. In the AGRISPECTRA campaign, no radisoundings were launched, as has been commented before, so in this case we only have the value measured with a sunphotometer in the "El Arenosillo" site, located around 250km far from the field and which is included in the AERONET (Aerosol Robotic Network). Details can be found at http://aeronet.gsfc.nasa.gov. The total water vapour content extracted from the AERONET data has been scaled to the altitude of the flight (980m AGL) using the MODTRAN 4 code and assuming the atmospheric profile included in the midlatitude summer atmosphere. The test of the single-channel method is shown in Fig. 10a

The test of the single-channel method is shown in Fig. 10a for the SPARC/EAGLE and in Fig. 10b for AGRISPECTRA, with RMSE values of 1.6K and 1.9K, respectively. The Bias has been calculated as the mean value for the difference between the LST retrieved with the algorithm and the measured in situ. In both cases, the Bias is positive, which indicates that the algorithm overestimates the LST. This overestimation is more clearly shown in the results achieved in the AGRISPEC-TRA campaign, with a Bias of 1.7K. We attribute this to the poor characterization of the atmosphere during this experiment, in which a water vapour value measured 250 km far from the field site has been chosen. The results obtained with the singlechannel algorithm proposed in this paper agree with those obtained by Jiménez-Muñoz and Sobrino (2005) also from high resolution data over the Barrax test site, with RMSE<1.8K.

Results obtained with the split-window algorithm are shown in Fig. 11, in which RMSE values of 1.9 K and 1.6 K have been obtained for the SPARC/EAGLE and AGRISPECTRA campaigns, respectively. In this last case, the Bias is lower than the obtained with the single-channel method, which indicates that the split-window is less sensitive to an accurate knowledge of the water vapour content. Additional results obtained with the split-window algorithm in the AGRISPECTRA campaign can be found in Sepulere-Cantó et al. (in press). Despite similar

Table 5	
A text such as is a support and support of the text	(a) at different altitudes

Autospheric water vapora content (w) at effectent autores						
Campaign	Date	Altitude (km AGL)	w (g/cm ²)			
SPARC/EAGLE	15-July-2004	0.975	0.71			
SPARC/EAGLE	15-July-2004	0.975	1.49			
SPARC/EAGLE	15-July-2004	100	1.66			
SPARC/EAGLE	18-July-2004	2.745	0.79			
SPARC/EAGLE	18-July-2004	2.745	1.58			
SPARC/EAGLE	18-July-2004	100	1.74			
AGRISPECTRA	25-July-2004	0.980	0.90			
AGRISPECTRA	25-July-2004	100	2.54			

Values for the SPARC/EAGLE campaign have been obtained using the radiosoundings launched in situ and the MODTRAN 4 code. Water vapour for the AGRISPECTRA campaign has been obtained from the AERONET network and measured with a sumphotometer in the "El Arenosillo" site, around 250km far from the field. Total content has been rescaled using the MODTRAN 4 and assuming a midlatitude summer atmosphere in order to obtain the value for an altitude of 980m.

218



Fig. 10. Comparison between the land surface temperature retrieved with the single-channel method and the one measured in situ in the framework of the (a) SPARC/ EAGLE and (b) AGRISPECTRA field campaigns.

results have been obtained with split-window and singlechannel algorithms, the split-window technique provides better results over a world-wide scale, overall in wet atmospheres $(w>3g/cm^2)$, whereas single-channel methods only provide good results for low atmospheric absorption $(w<2g/cm^2)$, as has been stated by Sobrino and Jiménez-Muñoz (2005).

Fig. 12 shows the results obtained with the TES method in the framework of the SPARC/EAGLE campaign. This method provides the best estimation of the LST, with a RMSE of 1.4K. The Bias is similar to the previous algorithms, around 1 K. This result suggests that from sensors providing multispectral thermal data (with at least four thermal bands) it is possible to retrieve the LST with slightly better accuracy. However, the main constraint is that the atmospheric correction needs to be well controlled.

Finally, Fig. 13 shows the AHS image (acquired on 15 July 2004 at 12:43 UTC) for the at-sensor brightness temperature obtained from band 75, the LST image obtained with the TES method and the difference image. This difference shows the impact of the emissivity and atmospheric effects on the LST retrieval. Differences between temperatures obtained from atsensor data and the ones obtained after compensation of atmospheric and emissivity effects range between 2 and 5K. The lowest differences (<2K) are obtained over vegetated areas and water (dark tones in the image), in which the emissivity is near to 1 and the differences are only due to the atmospheric effect. This example shows the importance of the atmospheric and emissivity correction in order to obtain accurate values of LST.

6. Summary and conclusions

Land surface temperature (LST) is a key parameter in many environmental studies, as energy balance, evapotranspiration, global circulation models, and vegetation monitoring, among others. In the last years, different airborne sensors with several thermal bands have been developed and made available for imagery acquisitions. The data extracted from these sensors provide the opportunity of retrieving LST with a very-high spatial resolution, which is important, for example, in the



113



Fig. 11. Comparison between the land surface temperature retrieved with the split-window method and the one measured in situ in the framework of the (a) SPARC/ EAGLE and (b) AGRISPECTRA field campaigns.



Fig. 12. Comparison between the land surface temperature retrieved with the TES method and the one measured in situ in the framework of the SPARC/EAGLE field campaign.

114

J.A. Sobrino et al. / Remote Sensing of Environment 102 (2006) 99-115



Fig. 13. (a) At-sensor brightness temperature obtained from the AHS band 75 Fig. 15 (a) resentation to infinite the impartance obtained with the TES method and (e) difference image (ΔT =LST –T75). The AHS image was acquired on 15 July 2005 over the Barrax test site (see Fig. 1) at 12:43 UTC and the spatial resolution is 7m. Temperature values are given in K.

context of precision agriculture and vegetation stress monitoring. The airborne hyperspectral scanner (AHS) sensor, with 10 thermal bands (from 71 to 80) covering the range between 8 and 13 µm, is an example of the new generation of airborne sensors with multispectral thermal infrared capabilities.

The feasibility of retrieving LST from the 10 AHS thermal bands has been analyzed in the framework of the SPARC and EAGLE field campaigns, which took place simultaneously in the Barrax (Albacete, Spain) test site, and in the framework of the AGRISPECTRA project, which took place in an orchard crop field in Córdoba (Spain), all of them in July 2004. For this purpose, the single-channel, split-window, and TES (temperature and emissivity separation) methods have been adapted to the AHS characteristics. Previously, the at-sensor brightness temperatures extracted from the AHS thermal bands were compared with in situ measurements carried out over different plots (bare soil, water, grass, and corn) in order to assess the optimal selection of bands for LST retrieval. This comparison has shown that the AHS sensor had a calibration problem with bands 71, 72, and 73. Bands from 75 to 79, located in the atmospheric window between 10 and 12µm, seem to agree better with in situ data, so these bands were finally selected. The single-channel method, which only uses one thermal band, was applied to AHS band 75 because this band showed the highest atmospheric transmissivity. The split-window algorithm, which used a combination between two thermal bands, was applied to AHS bands 75 and 79, because this combination showed the lowest error on the LST. Both algorithms were validated using ground truth data, showing similar results, with root mean square errors (RMSE) lower than 2K. The good results obtained with the single-channel method are attributed to the low

atmospheric absorption during the flights, with total atmospheric water vapour contents lower than 1.8 g/cm2 for the high flights (2745 m above ground level) and lower than 1 g/cm2 for the low flights (945 m above ground level). With higher water vapour contents and, therefore, with higher atmospheric absorption, the split-window algorithms are expected to provide better results, whereas single-channel algorithms become almost unusable (Sobrino & Jiménez-Muñoz, 2005). The TES method, developed originally for the ASTER sensor by Gillespie et al. (1998), was applied to AHS bands from 75 to 79, and it was also tested with simulated data, with a RMSE<1.1K. The TES method provided the best result in the validation with ground truth data, with a RMSE<1.4K. It should be noted that this method also provides land surface emissivities, which are assumed to be known a priori in the single-channel and split-window methods, despite that the emissivity spectra obtained with the TES have not been tested or validated. According to the results obtained in this study, the use of multispectral thermal data leads to a more accurate values of surface temperatures, albeit slightly, and it also solves the problem of the emissivity uncertainty. However, an accurate atmospheric correction should be performed to the sensor data in order to obtain the good results pointed out

Acknowledgements

We thank the European Union (EAGLE, project SST3-CT-2003-502057), the Ministerio de Ciencia y Tecnología (DATASAT, project ESP2005-07724-C05-04), and the European Space Agency (SPARC, project 18307/04/NL/FF) for the financial support. Funding support provided for the Agrispectra project AGL2002-04407-C03 from the Spanish MCyT is acknowledged. We also thank Don Sabol (University of Washington) and Cindy Grove (Jet Propulsion Laboratory) for laboratory measurements of soil spectra.

- Balick, L. K., Jeffery, C. A., & Henderson, B. G. (2003). Turbulence-induced spatial variation of surface temperature in high-resolution thermal IR satellite imagery. *Proceedings of SPIE*, vol. 4879 (pp. 221-230). Crete, Greece, SPIE—the International Society for Optical Engineering.
 Becker, F., & Li, Z. -L. (1990a). Temperature independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 32, 17-33.
 Becker, F., & Li, Z. -L. (1990b). Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 569-394.
 Berk, A., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Chetvyand, J. H., Bernstein, L. S., Shettle, E. P., et al. (1999). MODTRAV user's manual Hanscom AFB, MA: Air Force Research Laboratory.
 Dash, P., Gönsche, F. -M., Olesen, F. -S., & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and

- temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice—current trends. International Journal of Remote Sensing, 23(13), 2563-2594
- 2563-2594. Deschamps, P. Y., & Phulpin, T. (1980). Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 jun. Boundary-Layer Meteorology, 18, 131-143. Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J. S., Hook, S., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spacebone thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113-1126. images. IEI 1113-1126.



- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel Junetez-Muñoz, J. C., & Soorno, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22). doi:10.1029/2003JD003480. Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2005). Atmospheric water vapour content retrieval from visible and thermal data in the framework of the DAISEX campaigns. *International Journal of Remote Sensing*, 26(15), 2010.
- 3163-3180. 3163-3180.
 Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P., Nerry, F., & Ottlé, C. (2004). Land surface temperature retrieval techniques and applications: Case of AVHRR. In D. A. Quattrochi, & J. C. Luvall (Eds.), *Thermal remote sensing in land surface* processes (pp. 33-109). Florida, USA: CRC Press.
 Kondratyev, K. Y. (1969). Radiation in the atmosphere. New York: Academic
- Pres
- Press. McClain, E. P., Pichel, W. G., & Walton, C. C. (1985). Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90(11), 587–601. McMillin, L. M. (1975). Estimation of sea surface temperature from two infrared McMillin, L. M. (1975).
- window m nts with different absorption. Journal of Geophysical
- window measurements with different absorption. Journal of Geophysican Research, 80, 5113–5117.
 Moreno, J., Calera, A., Caselles, V., Cisneros, J. M., Martinez-Lozano, J. A., Meliá, J., et al. (2001). The measurement programme at Barrax. DAISEX final results: workshop, SP-499 (pp. 43–51). Noordwijk (Holland): ESA Publications Division
- Fundations Drivation. Nerry, F., Labed, J., & Stoll, M. P. (1990). Spectral properties of lands surfaces in the thermal infrared band: Part II. Field method for spectrally averaged emissivity measurements. *Journal of Geophysical Research*, 95, 7027–704. 7027-7044
- 1027 (044, 074), 0493). Land surface temperatures derived from the AVHRR and ATSR: 1. Theory. Journal of Geophysical Research, 89(16), 689-702.
 Price, J. C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 AVHRR. Journal of Geophysical Research, 89, 7231-7237.
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719–3746. Quattrochi, D. A., & Luvall, J. C. (1999). Thermal infrared remote sensing data
- Quatrochi, D. A., & Luvali, J. C. (1999). Infermat infrared remote sensing data for analysis of landscape ecological processes: Methods and applications. *Landscape Ecology*, 14(6), 577–598. Quatrochi, D. A., & Luvali, J. C. (2004). Thermal remote sensing in land surface processes (pp. 440). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. Scott, N. A., & Chedin, A. (1981). A fast line by line method for atmospheric
- sensing in land
- absorption computations: The authomatized atmospheric absorption atlas. Journal of Meteorology, 20, 802-812.

- Sepulcre-Cantó, G., Zarco-Tejada, P.J., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., de Miguel, E., Villalobos, F.J., in press. Within-field thermal variability detection as function of water stress in *Olea europaea* L. orchards with high-spatial remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* (available online).
- Sobrino, J. A., Caselles, V., & Coll, C. (1993). Theoretical split window algorithms for detern nining the actual surface temperature. Il Nuovo Cimento, 16 219-236
- Cimeno, 10, 219–250.
 brino, J. A., Coll, C., & Caselles, V. (1991). Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR Channels 4 and 5. *Remote* Sensing of Environment, 38, 19–34.
- Sobrino, J. A., & Jiménez-Muñoz, J. C. (2005). Land surface temperature training in A., te Immal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission. Journal of Geophysical Research, 110(D16103). doi:10.1029/2004JD005588.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, Solitino, J. N., Jintervaniano, F. C., Inchanizar, Z., Stoniki, H., Ioning, M., Solia, G. (2004). Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax test site. *International Journal of Remote Sensity*, 25(1), 215–230. Solvino, J. A., Li, Z. L., Soria, G., & Jiménez, J. C. (2002). Land surface
- temperature and emissivity retrieval from remote sensing data. Recent Research Developments on Geophysics, 4, 21-44.
- Research Developments on Geophysics, 4, 21–44.
 Sobrino, J. A., Li, Z. -L., & Stoll, M. P. (1993). Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(2), 946–952.
 Sobrino, J. A., Li, Z. -L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1994). Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(2), 934–953.
 Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land over dynamic monitoring. Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353–366.
 Sun, D., & Pinker, R. T. (2003). Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of Geophysical Research*, 108(D11). doi:10.1029/2002ID002422.

- Wan, Z., & Li, Z. -L. (1997). A physics-based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 980–996. surface et

Anexo IV

Anexo IV

Detecting Water Status in Open Canopies with thermal \mbox{ASTER} Imagery and DART radiative transfer simulation

G. Sepulcre-Cantó, P.J. Zarco-Tejada, J.A. Sobrino, J. Berni, J.C. Jiménez-Muñoz

Corresponding author:

Pablo J. Zarco-Tejada Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) Alameda del Obispo, s/n 14004 - Córdoba Spain Tel: +(34) 957 499 280 ; +(34) 676 954 937 Fax: +(34) 957 499 252 e-mail: pzarco@ias.csic.es http://quantalab.ias.csic.es

> Submitted to *Remote Sensing of Environment* February 2008

> > Abstract

This work provides a description of the research conducted to assess methods for the detection of water status in open-tree canopies using ASTER visible and thermal satellite imagery and DART radiative transfer simulation model. Summer and winter ASTER images were acquired over a study area in southern Spain during a 6-year period. A total of 1076 olive orchards were monitored in this area, obtaining field location, field area, tree density, and irrigation scheme information for each field. Surface temperature images from ASTER were estimated using the Temperature and Emissivity Separation (TES) method. A panchromatic ortho-rectified imagery dataset collected over the entire area at 0.5 m resolution was used to estimate orchard vegetation cover for each field. An assessment was conducted to evaluate the hypothesis that irrigated orchards with the same vegetation cover yield lower temperature than rainfed orchards, due to higher stomatal conductance. In addition, a higher Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is expected on irrigated trees due to larger crown densities. Results for summer ASTER thermal images showed differences between irrigated and rainfed orchards of up to 2 K for fields with the same cover, decreasing the differences down to 0.5 K in ASTER winter images due to the lack of water stress. An approach based on a cumulative index Tc-Ta / NDVI for the 6-year ASTER time series was capable of detecting differences between irrigated and rainfed open-canopy orchards associated with the irrigation scheme, obtaining 78% success on field-to-field assessments of the hypothesis. These experimental ASTER results were confirmed with DART radiative transfer model used to study the influence of vegetation cover, LAI and background temperature in the potential temperature differences between open canopies under different water status levels. Model simulated temperature differences between rainfed and irrigated orchards agreed with those obtained from ASTER imagery. Potential implications for evapotranspiration estimation in non-homogeneous canopies are discussed, showing that temperature difference between aggregated pixels and pure crowns in open canopies yield up to 20 K in summer periods.

Key words: ASTER, canopy temperature, vegetation index, irrigation status, water stress, DART, radiative transfer.

0

2

1. Introduction

Understanding crop water relations is critical for the application of optimum management practices to obtain maximum productivity levels. In particular, the accurate and timely detection of crop water status as function of the irrigation scheme is a key factor for water management purposes and water supply requirements (Fereres & Soriano, 2007). In addition, vegetation water status detection from remote sensing imagery has important implications in forestry (Gao & Goetz, 1995), it is essential for drought assessment (Peñuelas et al., 1993), and it is a major driver in predicting fire risk (Chandler et al., 1983; Pyne et al., 1996; Ustin et al., 1998).

Traditional methods for estimating crop water requirements use vegetation indices such as the *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI; Rouse et al., 1974) or the *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI; Huete, 1988), both of them related to vegetation cover and structure, to predict crop coefficients (Kc) (Bausch & Neale, 1987; Ray & Dadhwal, 2001; Tasumi & Allen 2007). Such Kc coefficients incorporate the crop development stage along with the reference evapotranspiration (ETo) to estimate crop evapotranspiration (ETc). These methodologies based on the relationship between NDVI (or SAVI) and Kc have been successfully applied to herbaceous crops where vegetation gradually covers the soil as function of the crop development stage. Limited work has been conducted on this topic on tree crops, being an example the comparison conducted between ET estimated from satellite data and measured by eddy covariance on unstressed pecan orchards (Wang et al., 2007).

On the other hand, studies focused on water stress detection and identification of irrigated and rainfed fields for land classification purposes are entirely based on NDVI

3

(LAI) differences (Mo et al., 2004; Ines & Honda, 2005), obtaining information at sub-pixel level from medium and low spatial resolution imagery. Nevertheless, these successful methods for discriminating irrigated from rainfed herbaceous crops may not be valid for some perennial canopies, both natural vegetation and agricultural crops, where changes in structure as function of water status levels are very slow and not visually detectable. Work by Sepulcre-Cantó et al. (2006; 2007) proved the capability of high resolution (2 m) airborne thermal remote sensing imagery to detect water stress in orchard canopies, assessing the potential application of water stress detection methods to thermal ASTER imagery. Water stress develops in crops when evaporative loss exceeds the supply of water from the soil. When the plant is stressed and transpiration decreases due to the stomatal closure, crop canopy temperature tends to rise because of the reduction in evaporative cooling (Slatyer, 1967). In a previous study, Sepulcre-Cantó et al. (2007) demonstrated the feasibility for mapping airborneestimated crown temperature minus air temperature (Tc-Ta) as an indicator of crown stem water potential and conductance in open-canopy crops (olive and peach trees) grown under regulated deficit irrigation. High resolution thermal imagery was capable of identifying individual trees grown under different irrigation schemes, yielding up to 5 K difference detected by the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) thermal sensor. In addition, even very small crown temperature differences (i.e. 0.5 K) as a function of mild water deficits imposed by commercial irrigation schemes could also be detected remotely with high resolution airborne imagery in peach canopies.

An assessment comparing the spectral and spatial resolution for airborne AHS and satellite ASTER sensors suggested the potential detection feasibility of the water status in open tree canopies with ASTER, although effects caused by the soil and shadows in

L

4

such non-homogeneous canopies required a dedicated simulation study. The remote detection of the water status in open canopies poses the additional complexity of pixel-level effects due to the direct soil and shadow thermal effects, scene components with large thermal differences. Such complexity is larger in evergreen crops where the water status effects in the structure of the tree are less visually detectable than in other crops. In addition, these orchard crops are planted in varying grid patterns, therefore resulting in different vegetation cover percentages that affect both vegetation indices (i.e. NDVI) and pixel temperature (i.e. Tp-Ta) as function of each scene component. As an example, two orchard fields planted under different grid patterns may have the same canopy NDVI and/or pixel temperature (Tp) depending on the actual crown LAI, soil reflectance and soil temperature, and the amount of shadows due to the geometries of the trees. This fact has important implications in ET estimation models conducted with NDVI and pixel temperature as input such as SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) or METRIC (Allen et al., 2005), potentially leading to erroneous ET estimates due to large Tpixel-Ta values (in the order of 15-20 K) which in fact represent only 2-3 K Tcrown-Ta differences. Moreover, these models use NDVI as an indicator of canopy roughness, considering vegetation percentage cover, but generally not accounting for shadow effects on these open-tree canopies.

Several studies have used the relationship between Tc and NDVI (reviewed by Kustas & Norman, 1996) proving the capability of combining the thermal and the vegetation index NDVI for evapotranspiration estimation. Nevertheless, further studies are required to account for scene components in non-homogeneous canopies, assessing the effects of the canopy architecture and soil effects. Three-dimension (3-D) radiative transfer models simulate open canopies to account for each individual scene component,

j

5

separating pure vegetation, soil and shadows (Zarco-Tejada et al., 2004; see work by Suárez et al., 2008 modelling PRI index for open tree orchards for water stress detection). Nevertheless, such modelling approach using 3-D models for open canopies is rare in the thermal domain due to limited theoretical models available. The *Discrete Anisotropic Radiative Transfer* model (DART) (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) was developed at first for the short-wave domain, being successfully tested against reflectance measurements (Gastellu-Etchegorry et al., 1999) and applied to obtain forest canopy chemistry from remote sensing data (Gastellu-Etchegorry & Bruniquel-Pinel, 2001). Current DART model capability includes the thermal domain (Guillevic et al., 2003), simulating the propagation and the interactions within the canopy three-dimensional architecture of TIR radiation emitted by the cover components or incoming from the atmosphere.

In summary, this manuscript makes progress on assessing methods for the detection of the water status in open canopies, combining vegetation indices and thermal information obtained from ASTER imagery. A radiative transfer simulation conducted with DART model is used to simulate open orchards to assess the effects of the vegetation cover, crown LAI and background temperature on the canopy temperature used for detecting water status levels.

2. Materials y Methods

2.1. Study Site description

The experimental study was conducted in a 60x60 km area in southern Spain $(37^{\circ} 18^{\circ} N, 4^{\circ} 42^{\circ} W)$. The climate of the area is Mediterranean with an average annual rainfall of 447 mm, concentrated from autumn to spring, and a reference annual

6

evapotranspiration (ETo) of 1246 mm. The area is located at 500 m altitude above sea level and generally flat. In this study area, 1076 olive orchards (*Olea europaea* L.) with different planting grid densities were monitored between 2000 and 2006 years. A total of 134 olive orchards were irrigated using drip irrigation methods, and 942 olive orchards were non irrigated (rainfed) (Figure 1). Detailed information from the 1076 orchard fields monitored between 2000 and 2006 was obtained from a local co-operative to conduct a large validation study, including field locations, field area, tree density, and irrigation status for each individual field over the 6-year period.

2.2. ASTER imagery & auxiliary datasets

Imagery of the study area was acquired with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), one of the 5 instruments onboard TERRA satellite launched by NASA in 1999. The sensor has 3 spectral bands in the visible near-infrared (VNIR), 6 bands in the short-wave infrared (SWIR), and 5 bands in the thermal infrared (TIR) regions, with 15, 30, and 90 meters ground resolution respectively. The images acquired over the 6-year period for this study between 2000 and 2006 years included both summer and winter satellite acquisitions. The images were acquired at 11:30 GMT, corresponding to 13:30 h and 12:30 h local time for summer and winter, respectively. Meteorological data including air temperature for the date and time of each image acquisition were obtained from an automated meteorological station located within 30 km from the study area.

ASTER Level-1A imagery were processed applying radiometric and atmospheric correction methods. Radiometric coefficients and geolocation data were applied to obtain Level-1 B imagery. At-sensor radiance was converted into *top-of-atmosphere*

7

(TOA) reflectance using Equation 1 (Chander & Markham, 2003) and MODTRAN simulation:

$$\rho_{P} = \frac{\Pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^{2}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_{S}}$$
[1]

where ρ_P is the reflectance, L_{λ} the *at-sensor* spectral radiance, *d* the earth-sun distance in astronomical units, $ESUN_{\lambda}$ the mean solar exoatmospheric irradiance, and θ_S the solar zenith angle in degrees. ESUN_{λ} values were obtained with MODTRAN radiative transfer model (Berstein & Roberston, 1989) for the VNIR ASTER bands. Atmospheric correction was conducted using MODTRAN and water vapor data acquired from the *Aerosol Robotic Network* (AERONET) station located 170 km from the study area.

Thermal bands were used for the retrieval of land surface temperature using the *Temperature and Emissivity Separation* (TES) method (Gillespie et al., 1998). Two ASTER *Temperature Standard Products* (AST-08) scenes, summer and winter, were used to validate the retrieval of surface temperature from L1a products using the TES method for the rest of the ASTER dataset where AST-08 were not available (Figure 2). The determination coefficients obtained were $R^2=0.998$ for March 2001 image (Figure 2a) and $R^2=$ 0.87 for July 2001 image (Figure 2b), being the standard deviations obtained 0.1 K (March 2001) and 1.4 K (July 2001). Although Ts differences obtained between AST-08 and L1a calibration method for summer were 1.4 K for the entire scene, the comparison conducted for both scenes suggested a validity of the method

Ľ

8

used to estimate Ts using the TES method from the full database of L1a ASTER imagery used in this study.

Geographical location and identification for each study field were conducted by means of a vector map of the area using ArcGIS software (ESRI, Neuron Data Inc., USA) to extract image data for each individual orchard field under study. To avoid inaccuracies due to the different spatial resolutions for both ASTER imagery and the vector map, crop field attributes were extracted only from vectors overlapping at least 70% over an ASTER pixel. This approach was conducted individually for each crop field, removing crop fields smaller than the 90m x 90m ASTER pixel.

Due to the large heterogeneity found among orchards, with different planting grids, vegetation cover and leaf area index for each field, a criterion to compare field temperature among orchards was needed. Comparison between fields was conducted as function of crop cover percentage levels, therefore aiming at assessing the feasibility of detecting water status levels among fields with comparable soil and vegetation cover. Percentage vegetation cover was estimated for each field using the 0.5 m panchromatic ortho-rectified imagery collected over the entire area of study (Junta de Andalucía, 2005). The *Interactive Data Language software* (IDL) (ITT Corporation, NY, USA) was used to conduct an isodata classification (Tou & González, 1974) on each single orchard, enabling the separation between soil and pure crown pixels (Figure 3). This methodology enabled the correct identification of pure tree crowns for each field under study, despite the different planting patterns. Figure 4 shows the orthophotos acquired over the three orchard fields with different field size, soil colour, planting pattern and

1

9

percentage vegetation cover, showing the ASTER 10.657 µm band (Band 13) acquired over the same fields.

Optical indices related to vegetation structure and condition (Zarco-Tejada et al., 2005) (Table1) were used to study their potential to detect the effects of the different irrigation schemes, including the traditional NDVI (Rouse et al., 1974), greenness index (G), MTVI₁ (Haboudane et al., 2004), MCARI₁ (Haboudane et al., 2004), MTVI₂ (Haboudane et al., 2004), MCARI₂ (Haboudane et al., 2004), MSAVI (Qi et al., 1994), and OSAVI (Rondeaux et al., 1996). These indices were calculated using the visible and near-infrared ASTER bands acquired over the same study sites in order to assess structural changes potentially caused by the water status for each orchard field under study. Therefore, orchards were assessed for both surface temperature and structural vegetation indices over the 6 years.

2.3. ASTER Data Analysis

The mean field temperature was obtained from ASTER imagery as function of crop cover percentage intervals ranging between 15% and 55%, assessing temperature differences for irrigated and rainfed orchards under similar vegetation cover levels. The *field-to-field* comparison considered a "*success case*" when an irrigated orchard yielded lower temperature and higher vegetation index (i.e. NDVI) than rainfed (non-irrigated) orchard under the same vegetation cover. Therefore, the hypothesis under study claims that drip irrigated orchards yield lower crown temperature due to increased canopy conductance, and normally higher vegetation densities, assuming similar vegetation cover within the ASTER pixel. In addition to *field-to-field* temperature comparisons conducted for all 1076 fields under the same vegetation cover level, the method was

234

also conducted on orchards with the same NDVI and vegetation cover. This additional restriction was imposed to assess the feasibility of canopy temperature to detect thermal effects associated with field irrigation schemes independently from vegetation density effects.

A time-series cumulative index comprising ASTER orchard temperature minus air temperature (Tp-Ta) and NDVI was also assessed. The ratio Tp-Ta / NDVI stresses the behavior of Tp-Ta and vegetation density as function of the water status level. The Tp-Ta indicator is lower for irrigated orchards, while NDVI is generally higher for rainfed orchards. The 6-year ASTER imagery database was used to compute the cumulative 6-year indices for each crop field, including Tp, NDVI and Tp-Ta / NDVI. Additionally, a 10m-grid-size *Digital Elevation Model* (DEM) was used to obtain the mean slope and geographical position for each orchard, assessing the influence of these parameters in the mean temperature for each field under study.

2.4. Simulation with DART radiative transfer model in the thermal domain

The radiative transfer model *Discrete Anisotropic Radiative Transfer* (DART) was used to simulate 3-D scenes of olive groves to study the effects of different components (soil, vegetation and shadows) on the aggregated pixel temperature. DART can operate simulating reflectance or temperature, combining the ray tracing and the discrete ordinate methods. DART is designed to simulate different landscapes, comprising forest scenes with different tree types and scene components. The DART output is a 3-D matrix of cells containing the turbid material for simulating vegetation, and the opaque material for simulating surfaces such as ground, urban elements or trunks.

1

11

The inputs required for thermal DART simulations in this study were: i) viewing geometry input parameters, including the azimuth and zenith solar angles; ii) reflectance, maximum and minimum temperature of the different scene components (leaf, truck and soil) and leaf characteristics; iii) structural parameters: cell and scene dimensions, number of trees, architecture of the trunk and the crown, and the spatial distribution of the trees. The output of the model is a 3-D brightness temperature image. Figure 5 shows an example of a 3-D scene simulating an orchard with a typical pattern of an irrigated olive grove.

An assessment of DART model for simulating scenes of open tree orchards was conducted using diurnal airborne imagery acquired as part of the 2005 airborne campaign with the Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) (Sepulcre-Cantó et al., 2006; Sobrino et al., 2006). The AHS thermal imagery was acquired at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT on 25 July 2005 over an olive orchard under different irrigation treatments applied in blocks of 12 trees (detailed information about the irrigation methods, and field and airborne data collection can be found in Sepulcre-Cantó et al., 2006). At each airborne flight time, shaded and sunlit soil temperature, as well as pure crown temperature for trees under different irrigation treatments was monitored with IRTS infrared thermal sensors (model IRTS-P, Apogee, UT, USA). DART scenes for each AHS airborne overpass in the solar plane were computed, simulating the orchard temperature corresponding to each irrigation treatment block using model inputs from field IRTS instruments (Figure 6). Azimuth and solar zenith angles for the flight times 7:30, 9:30 and 12:30 GMT on 25 July 2005 were used, as well as structural olive orchard measurements conducted in the field. Figure 7 shows the relationship obtained between irrigation treatment block temperatures simulated with DART model from

12
external inputs acquired in the field, and those obtained with the AHS sensor for the three overflight times, obtaining RSMEs of 0.4, 0.8 and 0.6 K at 7:30, 9:30 and 12:30 GMT respectively. These results demonstrated the capability of DART model to aggregate scene components in open-canopy crops, a critical objective required for this study. A sensitivity analysis was conducted to assess the effects of canopy components on the pixel temperature for very different canopies. The effects of DART inputs on the potential differences expected between rainfed and irrigated olive orchards were assessed. The modelling study consisted on simulating orchards with varying percentage vegetation cover, crown LAI and soil temperatures, assessing the effects of crown temperature changes function of water stress levels on the aggregated pixel temperature that would be acquired by ASTER. Different vegetation cover levels were obtained on these series of examples, varying the number of trees in the scene and the inter-distance between trees (grid pattern). Figure 8 shows simulated nadir thermal images for an olive orchard with LAI=3 and 15% (Figure 8a), 35% (Figure 8b) and 55% (Figure 8c) percentage cover. Azimuth and solar zenith angles for the ASTER overpass time (11:30 GMT) on 6 July 2006 were used. Trunk temperature was fixed as the air temperature, and the mean soil and leaf temperature were set to the one measured on the same day in the experimental study described earlier. Leaf optical parameters were set to those reported in Zarco-Tejada et al. (2004). The DART model was run in monospectral mode with image brightness temperature as output. Table 2 shows the nominal values used for different inputs required to build the 3-D scenes with DART simulations, as well as the range interval for the parameters used in the analysis conducted in this study.

I

13

Finally, a simulation study was conducted to assess the relationships between crown temperature and pixel temperature in summer and winter. The objective was to assess the offset found between pixel temperature (aggregated vegetation and shaded / sunlit soil) and crown temperature (pure crowns) as function of percentage cover. Crown temperature minus air temperature (Tcrown-Ta) was varied between 1 and 5 K in summer, and between -2 and 2 K in winter, as observed on datasets acquired over 2 years with IRTS-P thermal sensors installed over olive trees. Soil temperature minus air temperature (Tsoil –Ta) was obtained at 11:30 GMT (hour of ASTER overpass) from the study site where thermal sensors were permanently installed. Table 3 shows the nominal values and range used in the simulation study.

3. Results

3.1. Results for ASTER temperature analysis as function of vegetation water status Mean orchard temperature as function of the water status for different crop cover percentage intervals showed detectable differences between irrigated and non-irrigated fields (Figure 9). The assessment was conducted for winter (non-stress) and summer (stress) images to study the crop temperature differences at the time of maximum and minimum water stress levels. Irrigated orchards in summer showed lower temperature values than rainfed orchard fields under the same percentage cover, while winter analysis showed smaller temperature differences potentially due to equal transpiration levels in the absence of water stress. Temperature differences between irrigated and rainfed orchards in summer yielded up to 2 K for orchards with percentage cover ranging between 20% and 30% (Figure 9a,b). Comparable results were found in both

14

stress periods (summer) on 21 September 2005 and 6 July 2006 ASTER images. Figures 9c,d show that mean temperature differences decrease down to 0.5 K for winter images (non-stress periods) (12 December 2000 and 2 January 2002). These results demonstrate that orchard temperature as function of the water stress status in non-homogeneous orchards are potentially detectable using ASTER imagery. Consistently, fields with lower percentage cover in summer showed higher pixel temperature values for both irrigated and rainfed orchards due to the soil influence. Differences between soil and tree temperature yielded up to 20 K (Sepulcre-Cantó et al., 2006), therefore causing large effects on canopy temperature for pixels with a low percentage cover.

Orchard (pixel) temperature (Tp) minus air temperature (Ta) differences as function of irrigation schemes for different crop cover percentage intervals were obtained for all images of the time series used in this study between 2000 and 2006 (Figure 10). Seasonal changes in the Tp-Ta difference between irrigated and rainfed orchard temperature were mostly driven by soil thermal influence on the ASTER pixel, ranging between 0 K (winter) and 20 K (summer). Despite the large Tp-Ta values obtained for summer (20 K), Tp-Ta values were consistent with those obtained in Sepulcre-Cantó et al. (2007) when aggregating pure vegetation, soil and shadows from high resolution AHS thermal imagery resampled to ASTER resolution. In such study, Te-Ta values of 2 K (calculated from pure crowns) raised up to 20 K when aggregating soil pixels due to the soil influence.

Irrigated orchards showed lower temperature than rainfed orchard fields for the same percentage cover for all the study period except in winter, under the absence of water

15

stress. However, same percentage cover could lead to differences in vegetation densities, as it would be expected on irrigated orchards that generally yield higher leaf area densities than rainfed tree crowns. Therefore, a careful comparison of thermal differences for fields with similar both percentage cover and vegetation density was needed using combined temperature, percentage cover and NDVI indicators.

3.2. Combining temperature and vegetation indices for detecting water status condition

The objective of this part of the study was to evaluate the capability of temperature and vegetation indices to assess the detection of the irrigation status. All possible *field-to-field* comparisons between irrigated and rainfed orchards under the same percentage cover were analyzed, with a total of more than 2000 *field-to-field* comparisons. The number of cases yielding *success* or *fail* for the hypothesis under assessment was counted. The hypothesis under assessment was that irrigated orchards would yield lower temperature and higher vegetation index than rainfed orchards. Table 4 shows the percentage of success for temperature and for the different vegetation indices proposed in this study. All the proposed indices were capable of detecting consistent differences between rainfed and irrigated olive orchards associated to the irrigation scheme. MTVI2 and MCARI2 indices, which are more resistant to soil influence, obtained lightly better results than the rest of vegetation indices (Table 4).

The variation of temperature, NDVI and Tp-Ta / NDVI for the entire ASTER time-series (Figure 11), shows the mean values of the irrigated and rainfed orchards with percentage cover ranges between 24% and 25% (29 orchards, 9 of them irrigated). It can be seen that rainfed orchards had higher temperature values than irrigated orchards for spring and summer images yielding 2 K differences, while these

T.

16

differences disappeared in winter. Consistently, the NDVI for the irrigated orchards obtained higher values than rainfed fields for all the study period. Results indicate that the combined Tp-Ta / NDVI index strengthen the properties of both temperature and NDVI to assess differences between irrigated and rainfed orchards, being sensitive to the absence of water stress in winter.

Cumulative values for the full period comprising 6 years of temperature, NDVI and Tp-Ta / NDVI from ASTER imagery were obtained (Table 5). The cumulative Tp-Ta / NDVI was the best indicator to detect the water stress differences between irrigated and non-irrigated orchards, yielding a 78% of success percentage in agreement with the hypothesis that irrigated orchards would have lower combined Tp-Ta / NDVI ratio than rainfed orchards. Moreover, results shown in Table 5 demonstrate the improvement obtained to detect the orchard water status using an ASTER time-series instead of information provided from a single ASTER image. Figure 12 shows an ASTER image over an area with irrigated and rainfed orchards (Figure 12a) and their corresponding normalized Tp-Ta / NDVI cumulative value (Figure 12b) for the entire ASTER time-series period. The cumulative index was normalized between 0 and 1, showing that orchards with lower cumulative values corresponded to irrigated orchards. However, careful use of this parameter is needed to identify irrigated and rainfed orchards, requiring making the comparisons under the same levels of vegetation percentage cover.

A further restriction was applied to minimize the effects caused by different vegetation densities in the pixel temperature at the ASTER resolution (especially important for open crops). Both NDVI and the percentage cover were fixed in the test conducted to compare orchard temperature as function of water status (Table 6). Even under these

17

restrictive conditions of orchard comparisons under the same percentage cover and NDVI, orchard temperature was able to detect differences between irrigated and rainfed orchards in summer, decreasing in the absence of water stress in winter. The feasibility of detecting different water stress levels in open canopies contributes additional information to traditional methods based solely on NDVI as an indicator of vegetation density. In other words, orchards with the same percentage cover and vegetation densities showed differences in pixel temperature associated with transpiration levels due to the water stress condition. In this case, no temperature differences between stressed and non-stressed fields could be explained by changes in canopy cover or vegetation density as function of the irrigation status. Figure 13 shows an example of two orchards with the same vegetation percentage cover (25%) and the same NDVI (0.18) and their corresponding ASTER temperature distribution obtained on 6 July 2006. In this case, mean temperature difference between these two orchards yielded 2 K, differences that could be associated with water stress conditions of the irrigated (Figure 13a,b) and non-irrigated (Figure 13c,d).

The maximum slope observed for all fields used in this study was 28°, while the mean slope value for all the olive orchards was 8°, obtaining correlations coefficients between orchard temperature and slope and geographical position without statistical significance. These results suggest that no effects on canopy temperature between irrigated and rainfed fields used in this study could be linked with topography such as slope or orientation.

18

3.3. Simulation results with DART

The previous results obtained with ASTER thermal imagery under different percentage cover, LAI and soil conditions were compared with simulations conducted with DART radiative transfer model. The simulation study conducted with DART was focused on assessing the thermal effects of vegetation percentage cover, LAI and soil temperature on ASTER pixel temperature (Figure 14). In particular, simulations assessed the potential thermal differences between rainfed and irrigated orchards as function of the mentioned canopy and soil characteristics. Figure 14a shows the variation of the differences between rainfed and irrigated orchard temperature as function of the vegetation percentage cover, assuming leaf temperature differences between stress levels ranging between 3 and 5 K. Consistently, it can be noticed that differences between rainfed and irrigated orchard temperature increases with the vegetation cover level. This is due to lower soil effects on pixel temperature at larger percentage cover. Differences between rainfed and irrigated pixels varied between 0.5 K (15 % percentage cover) and 1.5 K (55% percentage cover) for leaf thermal differences of 3 K, and between 0.8 K (15 % percentage cover) and 2.5 K (55% percentage cover) for leaf thermal differences of 5 K. These results obtained through DART simulation agreed with those observed in the experimental study with ASTER imagery on 6 July 2006 (Figure 8b), in which differences between irrigated and rainfed crop fields were 0.6 K for 15% percentage cover, and 1.1 K for 45% percentage cover.

To study the LAI effects on the temperature difference between rainfed and irrigated orchards at ASTER resolution, the assessment consisted on ranging crown LAI between 1 and 6, and leaf temperature differences between 3 and 5 K (Figure 14b), as function of percentage cover ranging between 15% and 55% for different crown LAI values (Figure

j

19

14c). The differences found between rainfed and irrigated simulated temperatures were not dependent on LAI. For leaf temperature differences of 3K, Trainfed-Tirrigated difference ranged between 0.69 K (LAI=1) and 0.80 K (LAI=5) for percentage cover of 25%. Nevertheless, LAI influenced Trainfed-Tirrigated for larger vegetation cover pixels (Figure 14c). For low LAI pixels, differences between Trainfed and Tirrigated were smaller (under 1 K for all the vegetation cover levels), due to larger effects caused by soil temperature on the aggregated ASTER pixel, diminishing the vegetation thermal differences. Figure 14d shows the simulated Trainfed-Tirrigated as function of vegetation cover for differences between rainfed and irrigated soil temperatures ranging between -6 and +6 K. This simulation assessment was conducted in order to evaluate the effects of different soil temperature levels on rainfed and irrigated orchards as a function of vegetation cover. As expected, soil temperature affects very much the difference between Trainfed and Tirrigated on low percentage cover pixels. Differences yielded 5.4 K for 15% percentage cover, while 4.7 K where obtained for 55% percentage cover when the difference between rainfed and irrigated soil was 6 K. At the other end, results were -4.5 K (15% percentage cover) and -1.4 K (55% percentage cover) when the difference between rainfed and irrigated soil was -6 K. It can be noticed the trend converging at high percentage cover (Figure 14d), although still showing large soil effects on pixel temperature as function of the soil temperature.

The simulation to assess the aggregated temperature as function of crown temperature for different background and tree densities in open canopies was conducted for different vegetation percentage cover levels (Figure 15), considering both summer (Figure 15a) and winter (Figure 15b). Results obtained for summer simulation yielded temperature differences between crown and pixel of 13 K for 45% vegetation percentage cover,

20

increasing up to 20 K for 15% vegetation percentage cover due to the soil influence. These summer results demonstrate a canopy temperature overestimation caused when assuming aggregated-pixel temperature as vegetation temperature for open-tree canopies. Winter simulation results suggest smaller differences between crown and pixel temperature due to lower soil temperatures found. The large differences found between crown and aggregated pixel temperature for summer (ranging between 10 and 20 K depending on percentage cover) have important implications for ET estimations that rely on surface temperature as input for the energy-balance equation in these open canopies.

4. Conclusions

Experimental results with 6 years of ASTER imagery and 1076 orchards demonstrate that thermal ASTER imagery detects small temperature differences found as function of water status levels in open canopies. Differences of up to 2 K between irrigated and rainfed fields with the same percentage cover were detected in summer, disappearing under non-stress conditions in winter ASTER imagery. A careful comparison of thermal differences for fields with similar percentage cover and vegetation density was conducted, using combined temperature, percentage cover and NDVI indicators. *Field-to-field* comparisons between irrigated and rainfed orchards under the same percentage cover showed that the proposed indices were capable of detecting consistent differences as function of the water status level.

A cumulative Tc-Ta / NDVI index for the 6-year ASTER time series was the best indicator to detect differences between orchards due to the different irrigation schemes,

1

21

yielding a 78% agreement with the hypothesis that irrigated orchards have lower Tc-Ta / NDVI ratio than rainfed orchards. Even when index comparisons were made under fixed NDVI intervals, T was able to detect differences between irrigated and rainfed orchards, yielding 65% of success. These results suggest that temperature contributes with additional information to NDVI for detecting water status levels in open canopies.

DART radiative transfer model in the thermal region was used to simulate different open canopy scenarios, accounting for pixel temperature as function of soil, percentage cover and LAI. A validation with high resolution AHS airborne imagery showed a good agreement between DART canopy simulation and AHS imagery resampled to ASTER spatial resolution. Root mean square errors of 0.4, 0.8 and 0.6 K between DART-simulated scenes and airborne AHS imagery were obtained for 7:30, 9:30 and 12:30 GMT, respectively. Model simulations demonstrated consistency of ASTER thermal data as function of water stress and percentage cover. The sensitivity analysis conducted with DART enabled the assessment of different inputs on the ASTERaggregated pixel temperature differences. As expected, the influence of LAI on aggregated pixels for detecting water status levels showed to be small (Trainfed-Tirrigated ranging between 0.69 to 0.80 for LAI=1 and LAI= 5 respectively, for leaf differences of 3K), but soil temperature highly influenced the differences between rainfed and irrigated orchards (yielding 4.7 K pixel temperature difference between rainfed and irrigated orchards with a soil temperature difference of 6 K for 55% percentage cover).

Ľ

22

The offset between pixel and crown temperature due to background effects was studied using DART model. Temperature differences obtained between pure crown and aggregated pixel yielded 13 K for 45% percentage cover, and 20 K for 15% percentage cover in summer. These large differences between crown and pixel temperature, mainly driven by soil effects, may be critical for accurate ET estimated in open canopies. This occurs when thermal remote sensing data from open canopies are inputs for evapotranspiration models based on the energy balance equation, conducting to erroneous sensible heat (H) estimates. This manuscript demonstrates the need for radiative transfer models working in the thermal domain to account for scene components on aggregated pixels. In addition, simulation results for pixel-crown relationships could be used to assess vegetation stress levels, estimating vegetation temperature from pixel temperature and therefore, a realistic Tc-Ta value in open canopies.

Acknowledgments

Financial support from Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), and Empresa Pública para el Desarrollo Agrario y Pesquero (DAP) is gratefully acknowledged, as well as the support from DIMAS (INCO-CT-2004-509087) and the Spanish Ministry of Science and Education (MEC) for the project AGL2005-04049 and CONSOLIDER CSD2006-67. Data access and technical support from Oleoestepa co-operative is acknowledged for technical support, as well as support provided by V. Vega and M. Pastor.

1

23

References

Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A. & Trezza, R. (2005). A Landsat based energy balance and evapotranspiration model in western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 251–268.

Bausch, W.C. & Neale, C.M.U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions of the ASAE*, 30 (3), 703–709.

Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212 (1-4), 198–212.

Berstein L. S. & Roberston D.C. (1989). MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7. Geophys. Lab, Bedford, MA ,Technical Report GL-TR-89-0122.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). Forest Fire Behaviour Effects. Fire in Forestry, vol I. NewYork: Wiley.

Chander, G. & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674-2677.

Fereres, E., & Soriano, A. (2007). Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. Journal of Experimental Botany ,58 (2), 147-159.

Gao, B. C., & Goetz, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 52, 155–162.

Gastellu-Etchegorry, J.P. & Bruniquel-Pinel, V. (2001). A modeling approach to assess robustness of spectrometric predictive equations for canopy chemistry. *Remote Sensing* of the Environment, 76 : 1-15.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., & Zagolsky, F. (1996). Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58, 131-156.

Gastellu-Etchegorry, J.P., Guillevic, P., Zagolski, F., Demarez, V., Trichon, V., Deering, D., & Leroy, M. (1999) Modeling BRF and radiation regime of tropical and boreal forests, Part I: BRF. *Remote Sensing of Environment*, 68, 281–316.

Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., & 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.

Guillevic, P., Gastellu-Etchegorry, J. P., Demarty, J. & Prévot, L. (2003) Thermal infrared radiative transfer within three-dimensional vegetation covers. *Journal of Geophysical. Research*, 108(D8), 4248, doi:10.1029/2002JD002247.

24

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337–352.

Huete, A.R. (1988). A soil adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment. 25, 295–309.

Ines, A. & Honda, K. (2005).On quantifying agricultural and water management practices from low spatial resolution RS data using genetic algorithms: A numerical study for mixed-pixel environment. *Advances in Water Resources*, 28(8), 856-870

Junta de Andalucía. (2005). Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y Orografía. DVD. I.S.B.N.: 84-96329-34-8.

Kamthonkiat, K. Honda, H. Turral, N. K. Tripathi & V. Wuwongse. (2005). "Discrimination of irrigated and rainfed rice in a tropical agricultural system using SPOT VEGETATION NDVI and rainfall data", *International Journal of Remote* Sensing, 26, 2527 – 2547.

Kustas, W. P. & Norman, J. M. (1996): Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring ove land surfaces. Hydrological Sciences – *Journal des Sciences Hydrologiques*, 41, 495-516.

Mo X., Liu S., Lin Z. , Xu Y., Xiang Y., & McVicar T.R. (2005) Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183, 301–322

Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905.

Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). Introduction to Wildland Fire. (2nd ed.). New York: Wiley.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y., and Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48,119-126.

Ray, S.S. & Dadhwa, I V.K. (2001). Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. *Agricultural Water Management*, 49, 239–249

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD, 1–371.

Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55, 59-107.

25

Sepulcre-Cantó, G., Zarco-Tejada, P.J., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., de Miguel, E. & Villalobos, F.J. (2006). Within-field thermal variability detection as function of water stress in Olea europaea L. orchards with high spatial remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31-44.

Sepulcre-Cantó, G., Zarco-Tejada, P.J., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Soriano, M.A., Fereres, E., Vega, V. & Pastor, M. (2007). Monitoring yield and fruit quality parameters in open-canopy tree crops under water stress. Implications for ASTER. *Remote Sensing of Environment*, 107, 455-470.

Slatyer, J. O. (1967). Plant-water relationships. New York: Academic press.

Sobrino, J. A. Jiménez-Muñoz, J. C. Zarco-Tejada, P., Sepulcre, G. & de Miguel, E. (2006). Land Surface Temperature derived from Airborne Hyperspectral Scanner Thermal Infrared data. *Remote sensing of environment*, 102, 99-115.

Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C. & Sobrino, J. (2007) Assessing Canopy PRI for Water Stress detection with Diurnal Airborne Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112,560-575.

Tasumi, M. & Allen, R. G. (2007).Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, 88 (1-3), 54-62.

Tou, J. T. and Gonzalez, R. C. 1974. Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

Ustin, S. L., Roberts, D. A., Pinzon, J., Jacquemoud, S., Gardner, M., Scheer, G., Castañeda, C. M., & Palacios-Orueta, A. (1998). Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing of Environment.*, 65, 280–291.

Wang, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P. & Miller, D.R. (2007). Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agricultural Water Management*, 88, 253–263.

Xiao, X. M., Boles, S., Liu, J. Y., Zhuang, D. F., Frolking, S. & Li, C. S. (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China usingmulti-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 95(4), 480–492.

Zarco-Tejada, P.J., J.R. Miller, A. Morales, A. Berjón, & J. Agüera, (2004). Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 463-476

Zarco-Tejada, P.J., Whiting, M., & Ustin, S.L. (2005). Temporal and Spatial Relationships between within-field Yield variability in Cotton and High-Spatial Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641-653.

1

26

Figure Captions

Figure 1. a) Image of the study area acquired on 21 September 2005 with ASTER sensor. The irrigated olive fields are in blue color and the rainfed olive fields in red color. b) A close up of the study area shows a field selection of the experiment.

Figure 2. Relationships obtained between land surface temperature (TES method) from L1a images and ASTER temperature standard product (AST-08) for a) 12 March 2001 image, and b) 22 June 2001.

Figure 3. Orthophotos acquired over three olive orchards with 17% (a), 23% (c), and 51% percentage cover (e), showing the isodata classification results (b,d,f).

Figure 4. Orthophotos acquired over three olive orchards with 17% (a), 23% (c), and 51% percentage cover (e), showing the corresponding ASTER image (10.657 μ m band) (b,d,f).

Figure 5. 3D scene simulation of an olive grove using DART model; a) front view, and b) nadir view.

Figure 6. Thermal images simulated with DART model for an olive orchard used in the study, simulating a) 7:30 GMT; c) 9:30 GMT; and e) 12:30 GMT. Thermal images obtained with the airborne AHS sensor at b) 7:30; d) 9:30, and f) 12:30 GMT on 25 July 2005.

Figure 7. Relationships obtained between DART-simulated temperature and thermal imagery acquired with the AHS sensor aggregated for the treatment blocks of the orchard used in the study at a) 7:30; b) 9:30, and c) 12:30 GMT on 25 July 2005.

Figure 8. Thermal images simulated with DART model for an olive orchard with a) 15%, b) 35%, and c) 55% percentage cover.

Figure 9. Mean ASTER temperature as function of percentage cover for irrigated olive orchards (grey line) and rainfed olive orchards (black line) on a) 21 September 2005 image, b) 6 July 2006 image, c) 12 December 2000 image and d) 2 January 2002 image.

Figure 10. Mean ASTER temperature as function of percentage cover for irrigated olive orchards (dashed line) and rainfed olive orchards (solid line) for the complete time series.

Figure 11. Variation of mean canopy temperature (a), mean NDVI (b), and mean (Tp-Ta)/NDVI (c) values over the study period for the irrigated and (grey line) rainfed (black line) orchards with percentage covers between 24% and 25%.

Figure 12. a) Irrigated (blue) and rainfed (red) orchards over the study area acquired on 21 September 2005 with ASTER sensor; b) normalized cumulative (Tp-Ta)/NDVI value calculated for each field over the entire study period.

27

Figure 13. Orthophotos acquired for an irrigated olive orchard (a) and a rainfed orchard (b) with same vegetation percentage cover (25%) and same NDVI (0.18), showing their corresponding ASTER temperature images (b,d).

Figure 14. DART simulations obtained for rainfed minus irrigated orchard temperature as function of percentage cover for different Trainfed-Tirrigated leaf gradients (a); effects of crown LAI for different Trainfed-Tirrigated leaf gradients (b); effects of percentage cover for different crown LAIs (c), and effects of percentage cover for different Trainfed-Tirrigated soil gradients (d).

Figure 15. Relationships between olive grove pixel temperature and canopy temperature for different vegetation percentage covers; a) for summer and b) for winter period.

1

28

Table 1. Vegetation indices used in this study.

Vegetation index	Equation	Reference
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + R_{red})$	Rouse et al. (1974
Modified Triangular Vegetation Index (MTVII)	$MTVI_{1} = 1.2* \ \textbf{[}1.2* \ \textbf{(}R_{800} \ \textbf{-}R_{550} \ \textbf{)} \ \textbf{-}2.5* \textbf{(} \ R_{670} \ \textbf{-} \ R_{550} \textbf{)} \textbf{]}$	Haboudane et al. (2004)
Modified Triangular Vegetation Index (MTV12)	$MTVI_{2} = \frac{1.5^{*} [1.2^{*} (R_{800} - R_{550}) - 2.5^{*} (R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2^{*}R_{800} + 1)^{2} - (6^{*}R_{800} - 5^{*} \sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane et al. (2004)
Greenness Index (G)	$G = R_{554}/R_{677}$	
Improved SAVI with self-adjustment factor L (MSAVI)	$MSAVI = \frac{1}{2} \left[2^{*}R_{800} + 1 - \sqrt{(2^{*}R_{800} + 1)^{2} - 8^{*}(R_{800} - R_{670})} \right]$	Qi et al. (1994)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$OSAVI = (1 + 0.16)^* (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARU)	$MCARI_{1} = 1.2* \ [2.5* \ (R_{800} \ \textbf{-} R_{670}) \ \textbf{-} 1.3* \ (R_{800} \ \textbf{-} R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI2)	$MCARI_{2} = \frac{1.5^{*} \left[2.5^{*} \left(R_{100} - R_{670} \right) - 1.3^{*} \left(R_{100} - R_{550} \right) \right]}{\sqrt{(2^{*} R_{600} + 1)^{2} - (6^{*} R_{600} - 5^{*} \sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane et al. (2004)

I

29

Table 2 Nominal values and range of parameters used for the olive grove DART simulation study.

Direction input parameters	Nominal values and range
Sun zenit angle (°)	165.4
Sun azimut angle (°)	184.7
Scattering properties and temperatures	Nominal values and range
Trunk reflectance	0.03
Trunk Tmin (K)	305
Trunk Tmax (K)	305
Soil reflectance	0.5
Soil T min (K)	212-324
Soil Tmax (K)	322-334
Leaf dimension (m)	0.01
Leaf adaxial reflectance	0.01
Leaf abaxial reflectance	0.01
Leaf transmitance	0.01
Leaf Tmin (K)	306-311
Leaf Tmax (K)	306-311
Structural parameters	Nominal values and range
Cell dimensions (x, y, z) (m)	0.5
Scene dimensions (x,y) (m)	90
Number of trees	64-224
Mean trunk height below crown (m)	1
Trunk height within crown (m)	1
Trunk diameter within the tree crown (m)	1
Mean trunk diameter below crown (m)	1
Crown height (m)	5
LAI	1-6
Inter trees distance (dx) (m)	8-11
Inter trees distance (dy) (m)	8-11
Crown ellipsoid first axis (m)	5
Crown ellipsoid second axis (m)	5

1

30

Table 3 Nominal values and range of	of parameters	used for the	comparison	between	Tcrown
and Tpixel DART simulation study.					

Summer simulation	Winter simulation
Nominal values and	Nominal values and
range	range
165.4	119
184.7	168
Nominal values and	Nominal values and
range	range
0.03	0.03
301.45	287.75
301.45	287.75
0.5	0.5
320.45	293.55
330.45	283.55
0.01	0.01
0.01	0.01
0.01	0.01
0.01	0.01
302.45-306.45	285.75-289.75
302.45-306.45	285.75-289.75
Nominal values and	Nominal values and
range	range
0.5	0.5
90	90
64-186	64-186
1	1
1	1
1	1
1	1
5	5
2	2
8-11	8-11
8-11	8-11
5	5
5	5
	Summer simulation Nominal values and range 165.4 184.7 Nominal values and range 0.03 301.45 301.45 301.45 320.45 330.45 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.0

I

31

Table 4 Success percentages for the hypothesis under study (irrigated orchards have lower temperature and higher vegetation index than rainfed orchards) for all comparisons between irrigated and rainfed orchards with the same percentage cover.

Parameter	Success percentage (%)								
	05/07/2000	12/12/2000	22/06/2001	02/01/2002	25/04/2003	21/09/2005	06/07/2006		
т	51	46	56	39	55	66	64		
NDVI	63	46	72	54	66	78	75		
MTVI1	66	47	71	52	66	78	76		
MTVI2	68	47	72	54	67	78	77		
G	62	49	62	61	63	67	68		
MSAVI	65	47	73	49	66	78	74		
OSAVI	64	47	73	52	67	78	76		
MCARI1	66	47	71	52	66	78	76		
MCARI2	68	47	72	54	67	78	77		

Table 5 Success percentages for all the comparisons between irrigated and rainfed orchards with the same percentage cover.

Parameter	Success percentage (%)								
	05/07/2000 12/12/2000 22/06/2001 02/01/2002 25/04/2003 21/09/2005 06/07/20						06/07/2006	Cumulative value	
Тр-Та	52	48	55	39	58	60	58	61	
NDVI	62	47	72	58	72	76	76	68	
(T-Ta)/NDVI	65	45	72	41	68	77	74	78	

Table 6 Temperature su comparisons between irrig the same percentage cover	access percentages for all the gated and rainfed orchards with and the same NDVI.
Date	Success percentage (%)
5/07/2000	57
12/12/2000	38

12/12/2000	38	
22/06/2001	65	
2/01/2002	41	
25/04/2003	65	-
21/09/2005	65	
6/07/2006	62	

1

32



Figure 2





34



259











38



I



40



1

41



1

42







(b)

| 44



Figure 14





I

46



Figure 15

