

Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica LANDSAT

Land surface temperature retrieval from historical LANDSAT data

J. C. Jiménez-Muñoz¹, J. A. Sobrino¹, J. Cristóbal², G. Sòria¹, M. Ninyerola², X. Pons³, V. Hidalgo¹, B. Franch¹, M. Romaguera¹, R. Oltra-Carrió¹, Y. Julien¹ y C. Mattar¹
jcm@uv.es

¹ Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Parque Científico de la Universidad de Valencia, P. O. Box 2205, E-46071 Valencia.

² Unidad de Botánica, Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallès.

³ Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Barcelona y Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, 08193 Cerdanyola del Vallès.

Recibido el 05 de marzo de 2010, aceptado el 30 de abril de 2010

RESUMEN

La teledetección térmica proporciona información de gran interés acerca de los procesos que ocurren en la superficie de nuestro planeta. En concreto, las imágenes térmicas a media y alta resolución permiten realizar distintos estudios medioambientales, como por ejemplo la estimación de la evapotranspiración a partir de la ecuación de balance energético, de gran aplicación en una problemática tan actual como es la gestión de los recursos hídricos. En este sentido, el lanzamiento en 1982 del sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo de la plataforma Landsat-4 y su posterior continuación en 1984 con el lanzamiento de la plataforma Landsat-5, actualmente operativa, ha permitido a los usuarios disponer de una base histórica de más de 25 años de imágenes térmicas a 120 metros de resolución espacial. La plataforma Landsat-7, puesta en órbita en 1999 con el sensor *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+), incrementó la resolución espacial de las imágenes térmicas a 60 metros, si bien debido a un fallo técnico del sensor su uso está muy limitado. El presente trabajo se centra en la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), que es la principal variable a obtener cuando se trabaja con datos medidos en el infrarrojo térmico. El trabajo presenta los distintos algoritmos que

ABSTRACT

Thermal remote sensing provides useful information of surface processes occurring in our planet. In particular, thermal imagery at medium and high spatial resolution is useful in many environmental studies, such as evapotranspiration estimation from the energy balance equation, which is a key parameter when working in water resources management. In this sense, the launch in 1982 of the *Thematic Mapper* (TM) sensor on board the Landsat-4 platform and its continuity in 1984 with the launch of Landsat-5 platform, currently operative, have provided the users with thermal imagery at 120 meters spatial resolution for more than 25 years. In addition, the launch in 1999 of the *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) on board the platform Landsat-7 have provided thermal imagery at 60 meters spatial resolution, despite that its use is limited due to a technical failure in the sensor. This paper focuses on the Land Surface Temperature (LST) retrieval, which is the main variable to be extracted when working with thermal infrared data. The paper shows the different algorithms that can be used to retrieve this parameter from Landsat data, highlighting those ones which allow an operational retrieval using approaches of atmospheric parameters only versus water vapor content as well as water vapor and air temperature.

pueden emplearse para la obtención de esta variable a partir de datos Landsat, haciendo un especial hincapié en aquellos algoritmos que permiten realizar un procesamiento de forma operacional utilizando aproximaciones de los parámetros atmosféricos únicamente con el contenido en vapor de agua o bien con vapor de agua y temperatura del aire. Los resultados de la validación muestran errores inferiores a 2 K en el primer caso o inferiores a 1 K en el segundo caso. En este trabajo se muestra también un ejemplo de obtención de TST a partir de una serie temporal de imágenes Landsat-5 TM adquiridas en el año 2009 sobre la zona agrícola de Barrax en Albacete.

PALABRAS CLAVE: temperatura de la superficie terrestre, infrarrojo térmico, monocanal, Landsat.

Validation results show errors below 2 K in the first case and below 1 K in the second case. This paper also shows an example of LST retrieval from multitemporal Landsat-5 TM imagery acquired in 2009 over the Barrax agricultural site in Albacete.

KEYWORDS: land surface temperature, thermal infrared, single-channel, Landsat.

INTRODUCCIÓN

El lanzamiento de la serie Landsat ha supuesto la creación de una base histórica de datos térmicos (desde 1982 hasta la actualidad) a media resolución espacial, de gran utilidad en distintos estudios medioambientales tales como la gestión de los recursos hídricos mediante la estimación de flujos de energía como la evapotranspiración tanto en cultivos como en zonas naturales a partir de la resolución de la ecuación de balance energético o el seguimiento de las islas de calor en zonas urbanas.

Cuando se trabaja con teledetección térmica, la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) es la principal variable a obtener. En este trabajo, se muestran los distintos algoritmos que permiten una estimación de este parámetro a partir de los datos térmicos proporcionados por la banda 6 (B6) de los sensores Thematic Mapper (TM) a bordo de las plataformas Landsat-4 (L4) y Landsat-5 (L5), y del sensor Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) a bordo de la plataforma Landsat-7 (L7).

La base teórica de los algoritmos de estimación de la TST es la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR) aplicada a la región del infrarrojo térmico, dada por:

$$L_{sen} = \left[\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L^{\downarrow} \right] \tau + L^{\uparrow} \quad (1)$$

siendo

L_{sen} : radiancia medida por el sensor ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

ε : emisividad de la superficie

B : ley de Planck

T_s : temperatura de la superficie terrestre (K)

L^{\downarrow} : radiancia atmosférica descendente ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

τ : transmisividad atmosférica

L^{\uparrow} : radiancia atmosférica ascendente ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)

Excepto la TST dada por el término T_s , el resto de magnitudes son espectrales, aunque no aparece explícitamente esta dependencia por simplicidad en la notación. De igual forma se ha omitido la dependencia angular.

ALGORITMOS

Inversión directa de la ETR

La TST (T_s) puede obtenerse mediante inversión directa de la ETR dada por la Ec. (1):

$$B(T_s) = \frac{L_{sen} - L^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L^{\downarrow}}{\tau\varepsilon} \quad (2)$$

donde finalmente T_s se obtiene por inversión de la ley de Planck. Nótese que para poder calcular T_s es necesario conocer, además de la emisividad de la superficie (incógnita presente en cualquier algoritmo de estimación de TST), los parámetros atmosféricos. En principio, estos parámetros pueden calcularse a partir de perfiles atmosféricos (que deben corresponder aproximadamente a la hora de adquisición de la imagen) y códigos de transferencia radiativa. A pesar de que este ha sido el principal inconveniente de la técnica monocanal, ya que no siempre es posible disponer de perfiles atmosféricos, actualmente el problema tiene en parte solución gracias a los resultados obtenidos por los modelos de predicción numérica. Un claro ejemplo de la aplicación a datos Landsat es la herramienta web desarrollada por Barsi *et al.* (2003; 2005), en la que el usuario obtiene los valores de τ , L^\uparrow y L^\downarrow para su imagen. Sin embargo, esta aplicación no permite una obtención de la TST de forma operacional para una serie histórica de datos, ya que la aplicación web únicamente proporciona un valor puntual para una imagen (por lo que el usuario tendría que rellenar cada vez el formulario web) y por el momento sólo para imágenes posteriores a 2003. En los siguientes apartados se muestran algunos algoritmos que podrían aplicarse de forma operacional a la serie Landsat.

Algoritmo monocanal de Qin, Karnieli y Berliner

Qin *et al.* (2001) desarrollaron un algoritmo monocanal para estimar la TST con datos L5B6 a partir de la expresión:

$$T_s = \frac{1}{c_6} \{ a_6 (1 - C_6 - D_6) + [b_6 (1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6] T_a - D_6 T_a \} \quad (3)$$

siendo $C_6 = \varepsilon_6 \tau_6$, $D_6 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon_6)\tau_6]$, $a_6 = 67.355351$, $b_6 = 0.458606$ y T_a la temperatura atmosférica media. Con el fin de evitar la dependencia de los parámetros τ y T_a , Qin *et al.* (2001) propusieron aproximaciones lineales de estos parámetros con el vapor de agua y con la temperatura del aire, respectivamente. Estas aproximaciones no son únicas, y dependen de la selección previa de una atmósfera estándar, aplicando también un criterio de temperatura del aire “alta” o “baja” no del todo bien establecido.

Algoritmo monocanal de Jiménez-Muñoz y Sobrino

Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) desarrollaron un algoritmo monocanal generalizado, en principio aplicable a cualquier banda térmica con un ancho de banda entre aproximadamente 0,5 y 1,5 μm . Este algoritmo monocanal viene dado por:

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (4)$$

donde γ y δ son dos parámetros que pueden obtenerse a partir de la radiancia (L_{sen}) o temperatura de brillo del sensor (T_{sen}) y ψ_i ($i=1,2,3$) son las llamadas funciones atmosféricas, que dependen en principio de los parámetros τ , L^\uparrow y L^\downarrow . Tal y como se ha comentado anteriormente, el algoritmo fue desarrollado en principio para poder aplicarse de forma general a cualquier banda térmica, aunque también se desarrollaron coeficientes particularizados para distintos sensores, entre ellos el TM de Landsat-5. Recientemente este algoritmo se ha actualizado y extendido su aplicación a datos L4B6, L5B6 y L7B6, tal y como se recoge en Jiménez-Muñoz *et al.* (2009). En el citado trabajo se muestran que los parámetros γ y δ pueden obtenerse de forma simplificada mediante las expresiones:

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{bL_{sen}}, \delta = T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b} \quad (5)$$

donde la constante b tiene valores de 1290, 1256 y 1277 K para L4B6, L5B6 y L7B6, respectivamente. El cálculo de las funciones atmosféricas se puede abordar de distintas formas, tal y como se detalla en la siguiente sección.

APROXIMACIONES PARA LAS FUNCIONES ATMOSFÉRICAS

A partir de perfiles atmosféricos

Tal y como se muestra en Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003), las funciones atmosféricas vienen dadas por:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau}; \psi_3 = L^\downarrow \quad (6)$$

Si se dispone de perfiles atmosféricos, junto con un código de transferencia radiativa, es posible obtener los valores de τ , L^\uparrow y L^\downarrow , y por tanto de las funciones ψ_i . Lógicamente esta es la forma más precisa de obtener estas funciones, pero presenta el mismo problema que la inversión directa de la ETR mostrada anteriormente, es decir, requiere de la disponibilidad de perfiles atmosféricos para la hora de adquisición de la imagen.

Dependencia con el vapor de agua

Con el fin de evitar la dependencia de perfiles atmosféricos, Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) propusieron una dependencia única con el vapor de agua atmosférico, ya que este componente atmosférico es el responsable de la mayor parte de la absorción atmosférica que se produce en la región del infrarrojo térmico. Utilizando notación matricial y considerando un ajuste cuadrático con el vapor de agua, w , las funciones atmosféricas pueden expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Los valores de la matriz de coeficientes C para datos L4B6, L5B6 y L7B6, obtenidas a partir de distintas bases de datos de perfiles atmosféricos, pueden encontrarse en Jiménez-Muñoz *et al.* (2009). Por ejemplo, para datos L5B6 y la base de datos con 61 perfiles atmosféricos (TIGR61) los coeficientes vienen dados por:

$$C = \begin{bmatrix} 0.08735 & -0.09553 & 1.10188 \\ -0.69188 & -0.58185 & -0.29887 \\ -0.03724 & 1.53065 & -0.45476 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Es importante resaltar que en este caso el único dato necesario para estimar la TST, además de la emisividad, es el vapor de agua, necesitando por lo tanto un parámetro menos (temperatura del aire) que el algoritmo de Qin *et al.* (2001).

Dependencia con el vapor de agua y la temperatura del aire

Las estimaciones de TST pueden mejorarse bajo determinadas condiciones (sobre todo en el caso de vapores de agua superiores a 2 g cm⁻²) si se introduce, al igual que en el algoritmo de Qin *et al.* (2001), una dependencia con la temperatura del aire además de la dependencia en vapor de agua, tal y como se propone en Cristóbal *et al.* (2009). Siguiendo la notación matricial utilizada en el caso anterior, y teniendo en cuenta una dependencia cuadrática tanto en vapor de agua como en temperatura del aire, las funciones atmosféricas vendrían dadas por:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & c_{17} & c_{18} & c_{19} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & c_{27} & c_{28} & c_{29} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} & c_{37} & c_{38} & c_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ T_a^2 \\ w \\ T_a \\ T_a^2 w \\ T_a w \\ T_a w^2 \\ T_a^2 w^2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Al igual que en el caso anterior, en la citada referencia pueden encontrarse los valores de las funciones ψ_i cuando se consideran estos dos parámetros de

entrada. Por ejemplo, para datos L5B6 y la base de datos con 61 perfiles atmosféricos (TIGR61) los coeficientes vienen dados por:

$$C = \begin{bmatrix} 1.63740 & 0.00023 & -22.18726 & -0.12026 & -0.00031 & 0.16682 & -0.01457 & 0.00003 & 16.95900 \\ -20.81055 & -0.00067 & 254.56043 & 0.38885 & 0.00320 & -1.81097 & 0.16857 & -0.00034 & -56.07190 \\ 8.76591 & -0.00083 & -74.97730 & 0.41644 & -0.00074 & 0.48030 & -0.05805 & 0.00009 & -51.53112 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Nótese que en este caso es posible mejorar las estimaciones de la TST pero se necesita un parámetro más de entrada, la temperatura del aire, de forma similar al caso del algoritmo de Qin *et al.* (2001), si bien el algoritmo monocanal con las funciones atmosféricas dadas por las Ec. (9) proporciona mejores resultados que el algoritmo de Qin *et al.*

Look-Up-Tables

Otra forma alternativa a las mostradas en los apartados anteriores para el cálculo de las funciones atmosféricas es el uso de Look-Up-Tables (LUTs), construidas con datos de simulación obtenidos a partir de bases de datos de perfiles atmosféricos y códigos de transferencia radiativa, tal y como se propone en Jiménez-Muñoz *et al.* (2009).

RESULTADOS

Validación del algoritmo monocanal

La precisión del algoritmo monocanal en su forma generalizada ha sido analizada tanto a partir de análisis de sensibilidad como a partir de medidas in situ aplicando éste a distintas bandas térmicas de sensores de observación de la Tierra (Jiménez-Muñoz y Sobrino, 2003). En el caso de utilizar la aproximación del vapor de agua, los resultados mostraron que el algoritmo proporciona buenos resultados bajo condiciones atmosféricas moderadas ($w < 2 \text{ g cm}^{-2}$), con errores inferiores a los 2 K. En Sobrino *et al.* (2004) el algoritmo monocanal, en la primera versión de su adaptación a datos L5B6, fue también comparado con el algoritmo de Qin *et al.* (2001), proporcionando resultados similares con la ventaja

adicional de utilizar un único dato de entrada. En el estudio presentado en Jiménez-Muñoz *et al.* (2009) el algoritmo monocanal actualizado y extendido a datos L4B6, L5B6 y L7B6 fue validado con datos simulados independientes, además de ser comparado con estimaciones de TST por inversión directa de la ETR a partir tanto de perfiles atmosféricos coincidentes con la fecha y hora de adquisición de la imagen como de perfiles atmosféricos obtenidos a partir de modelos de predicción numérica. Los errores en este caso fueron inferiores a 1,5 K cuando se utiliza la aproximación con el vapor de agua. En todos los casos la precisión del algoritmo monocanal es similar a la inversión de la ecuación de transferencia radiativa cuando las funciones atmosféricas se calculan directamente a partir de los valores de τ , L^\uparrow y L^\downarrow utilizando la Ec. (6).

La precisión y sensibilidad del algoritmo monocanal cuando se utilizan las funciones atmosféricas estimadas a partir de valores de vapor de agua y temperatura del aire ha sido igualmente analizada en detalle en Cristóbal *et al.* (2009). En el citado trabajo se muestra que utilizando datos simulados la aproximación con w y T_a mejora los resultados en comparación con el uso únicamente de w , resultado esperado ya que los parámetros atmosféricos dependen de estos dos parámetros. Los errores encontrados fueron de alrededor de 1 K. También se realizó una validación a partir de datos extraídos de imágenes Landsat 5 y 7 sobre una zona de Cataluña, utilizando vapor de agua del producto MODIS y temperatura del aire modelizada tal y como se detalla en Cristóbal *et al.* (2008). Los resultados mostraron que en algunos casos la aproximación con w y T_a mejora las estimaciones de la TST en comparación con el uso únicamente de w , mientras que en

otros casos los errores fueron similares para las dos aproximaciones.

El algoritmo monocanal se ha validado en el caso L7B6 (ETM+) utilizando los datos proporcionados por Coll *et al.* (2010). En el citado trabajo se presentan medidas de campo realizadas en una zona homogénea de arrozal en Valencia para un total de siete casos en coincidencia con imágenes Landsat7/ETM+ adquiridas en julio y agosto entre los años 2004 y 2007.

Los resultados obtenidos en la validación se muestran en la Figura 1. Se puede observar como en el caso de la aproximación tanto con vapor de agua como temperatura del aire el error cuadrático medio

es de 0,8 K, frente a un error de 1,7 K cuando sólo se considera el vapor de agua. Sin embargo, en este último caso se obtiene un mejor coeficiente de correlación lineal ($R^2=0,92$), indicando que la aproximación únicamente con vapor de agua se correlaciona mejor con las medidas de campo que en el caso de vapor de agua y temperatura del aire ($R^2=0,79$). Si se aplicara el ajuste entre datos proporcionados por el algoritmo y datos medidos en campo, el error en el caso de aproximación con vapor de agua sería de 0,36 K, mientras que en el caso de vapor de agua y temperatura del aire sería de 0,42 K, es decir, un error de 0,4 K en ambos casos.

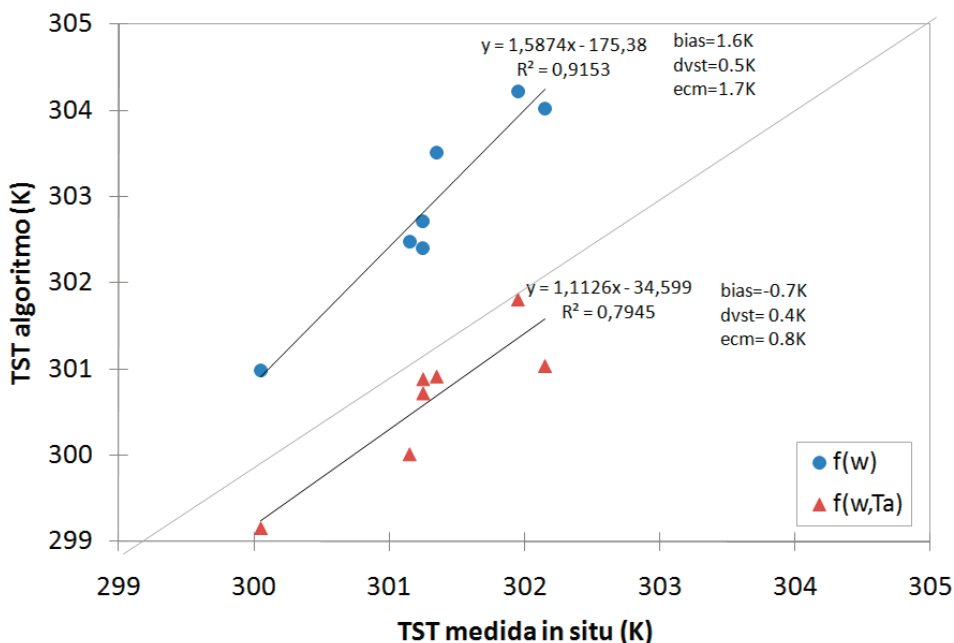


Figura 1. Validación del algoritmo monocanal para datos Landsat7-ETM+ a partir de medidas de campo en una zona de arrozal (Valencia) considerando la aproximación para las funciones atmosféricas únicamente con vapor de agua, $f(w)$, o la aproximación tanto con vapor de agua como con temperatura del aire, $f(w, Ta)$. La gráfica incluye algunas estadísticas básicas como el bias para la diferencia entre la TST del algoritmo y la TST medida in situ, la desviación estándar (dvst) y el error cuadrático medio (ecm), así como la recta de regresión y el coeficiente de correlación lineal (R^2)

Aplicación a una serie de imágenes Landsat en 2009

Como ejemplo de procesamiento operacional se muestra en este apartado los resultados obtenidos a partir de una serie de imágenes Landsat5-TM sobre la zona agrícola de Barrax (Albacete) y adquiridas durante el año 2009 (*Path/Row* 199/33 y 200/33).

Las imágenes fueron proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el marco del Plan Nacional de Teledetección (PNT). Eliminando aquellas imágenes contaminadas por nubes, un total de 20 fueron finalmente procesadas. El procesamiento incluye corrección geométrica, corrección atmosférica de las bandas visible e infrarrojo cercano a partir del código SMAC (Rahman and Dedieu, 1994) y

obtención de TST utilizando el algoritmo monocanal con las funciones atmosféricas calculada a partir de la aproximación con el vapor de agua según las Ecs. (7) y (8). Los valores de vapor de agua para cada una de las fechas de adquisición de las imágenes fueron obtenidos a partir del producto MODIS de vapor de agua (MOD05). La emisividad (ϵ) necesaria para aplicar la Ec. (4) se ha obtenido a partir del método de los umbrales del NDVI desarrollado por Sobrino y Raissouni (2000) y adaptado a Landsat5-TM en Sobrino *et al.* (2004) y Sobrino *et al.* (2008). La Figura 2 muestra una composición en color RGB (bandas 3, 2, 1 de Landsat5-TM) de la zona de Barrax, mientras que la Figura 3 muestra un ejemplo de mapas de NDVI y TST para tres fechas (5-mayo, 15-julio y 10-septiembre de 2009). En las gráficas incluidas en la Figura 4 se muestra la evolución del NDVI y la TST para las 20 fechas procesadas y para dos píxeles con distinta evolución fenológica, correspondientes a un cultivo de maíz y a un cultivo de cebada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado la viabilidad de obtener la TST a partir de datos térmicos adquiridos con los sensores TM y ETM+ a bordo de las plataformas Landsat (4, 5 y 7) revisando los distintos algoritmos existentes basados en la técnica monocanal. El trabajo se centra sobre todo en el algoritmo monocanal desarrollado por Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) en el que las funciones atmosféricas pueden obtenerse o bien de forma directa a través de los parámetros atmosféricos, o bien mediante aproximaciones únicamente con el contenido en vapor de agua atmosférico (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2009) o bien con vapor de agua y temperatura del aire (Cristóbal *et al.*, 2009). En este último caso es posible mejorar las estimaciones de la TST, si bien son necesarios dos parámetros de entrada (w y T_a). La ventaja de utilizar únicamente la aproximación con w radica en el hecho de que este parámetro puede obtenerse directamente a partir de los datos propo-

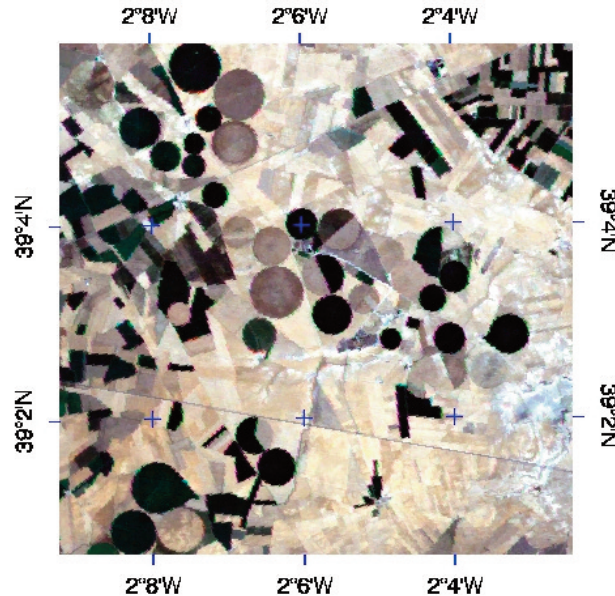
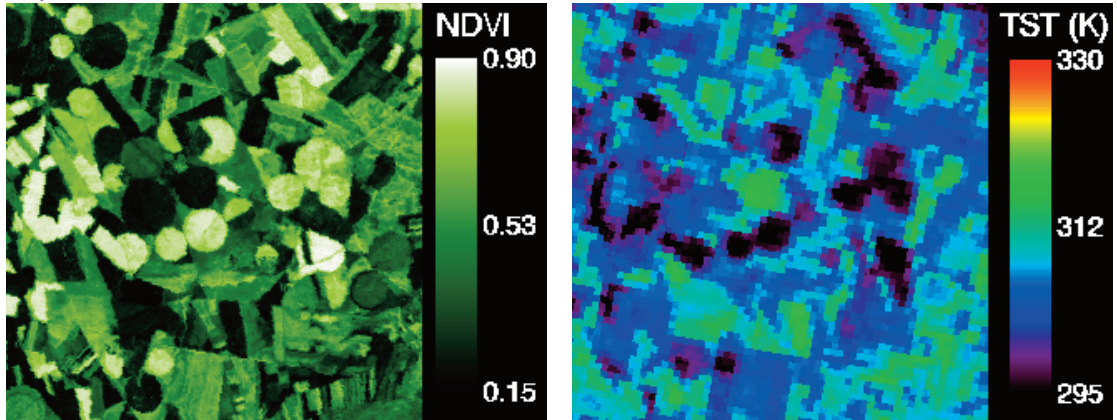
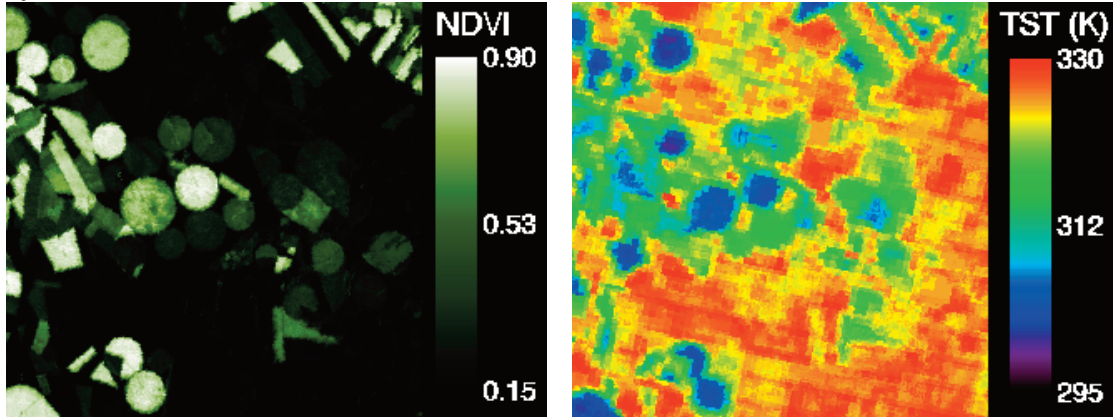


Figura 2. Composición RGB (color natural) a partir de una imagen Landsat-5 TM adquirida el 12 de julio de 2005 sobre la zona agrícola de Barrax (Albacete)

5 mayo 2009



15 julio 2009



10 septiembre 2009

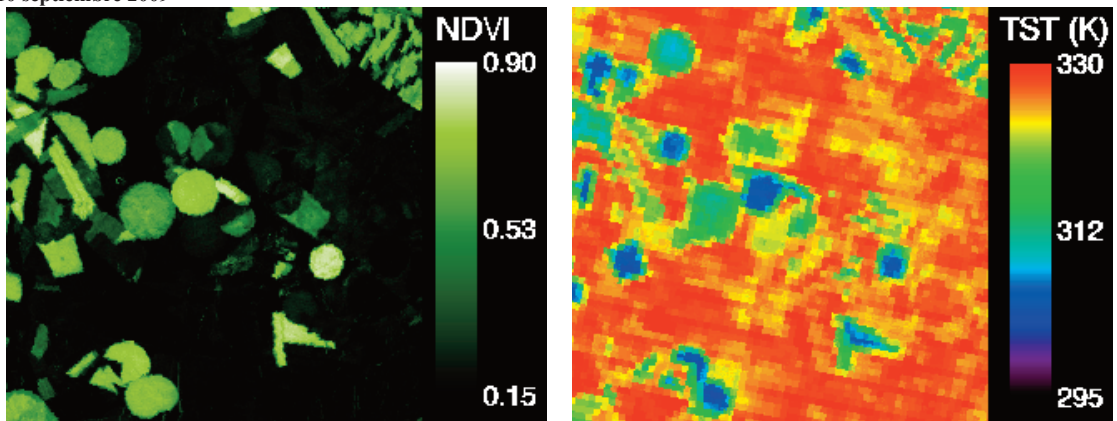


Figura 3. Ejemplo de imágenes de NDVI y de Temperatura de la Superficie Terrestre obtenida con el algoritmo monocanal a partir de imágenes Landsat-5 TM de la zona agrícola de Barrax (Albacete) durante el año 2009

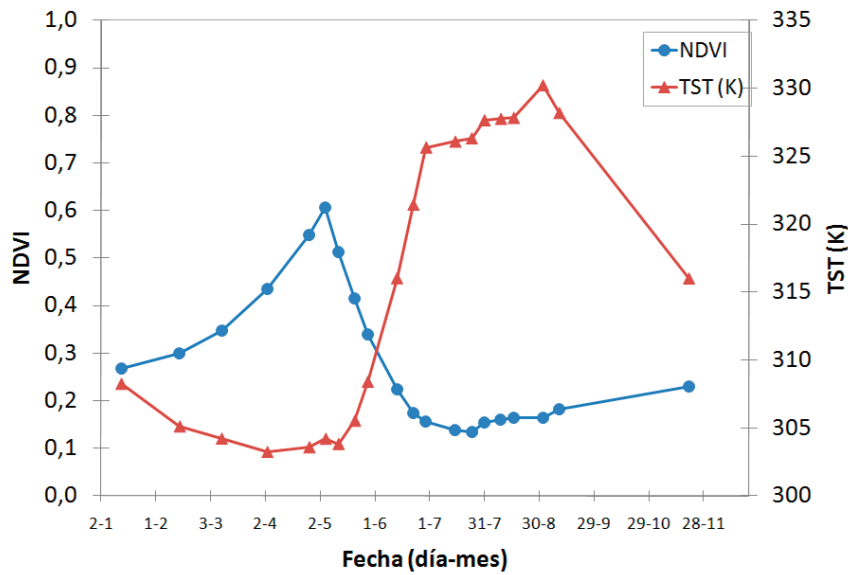
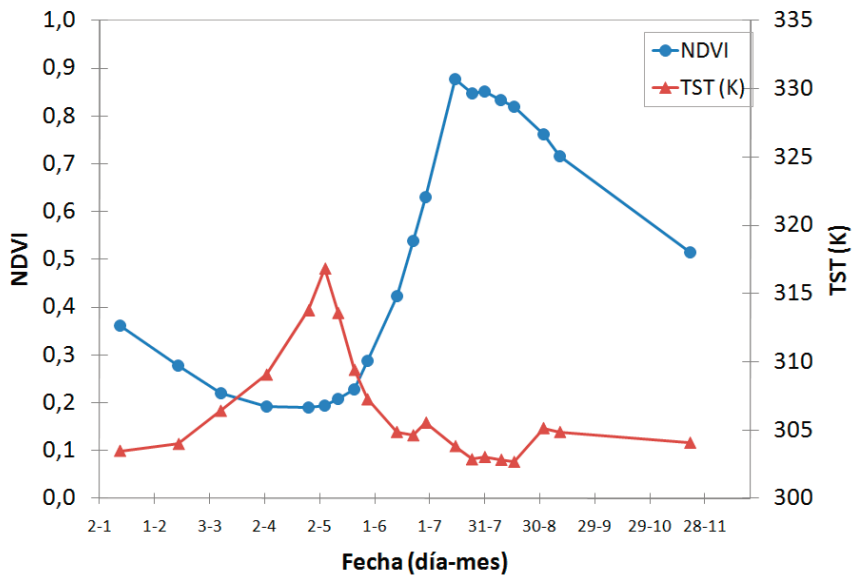


Figura 4. Evolución temporal del NDVI y de la Temperatura de la Superficie Terrestre obtenida con el algoritmo monocanal a partir de imágenes Landsat-5 TM de la zona agrícola de Barrax (Albacete) durante el año 2009. Las gráficas corresponden a dos píxeles con distinta fenología (cultivo de maíz, gráfica superior, y de cebada, gráfica inferior), tal y como puede observarse en la curva del NDVI

cionados por sensores destinados a la observación de la Tierra siempre y cuando tengan las bandas necesarias (por ejemplo sensores MODIS, MERIS, etc.). En todo caso la aproximación únicamente con w es válida para valores moderados ($w < 2 \text{ g cm}^{-2}$). En situaciones de valores de w altos se recomienda utilizar la aproximación con w y T_a o bien calcular las funciones atmosféricas directamente a partir de los parámetros atmosféricos.

La validación realizada a partir de valores medidos en campo en una zona de arrozal en Valencia y valores extraídos de imágenes Landsat-7 ETM+ ha proporcionado unos errores en la estimación de la TST con el algoritmo monocanal de 1,7 K y 0,8 K cuando se considera la aproximación con w o la aproximación con w y T_a , respectivamente. La aproximación con w proporcionó sin embargo una mejor correlación con las medidas de campo ($R^2=0,92$) que la aproximación con w y T_a ($R^2=0,79$). Como ejemplo de aplicación, se han obtenido mapas de TST a partir de una serie temporal de imágenes Landsat-5 TM adquiridas en el año 2009 sobre la zona agrícola de Barrax. La validación de estos resultados así como su explotación está actualmente en curso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en parte gracias a la financiación recibida por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (EODIX, AYA2008-0595-C04-01) y por la Unión Europea (CEOP-AEGIS, FP7-ENV-2007-1 no. 212921; WATCH, 036946). Agradecemos al Instituto Geográfico Nacional (IGN) por proporcionarnos las imágenes Landsat.

REFERENCIAS

- BARSI, J. A., BARKER, J. L., & SCHOTT, J. R. 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument, in *IGARSS IEEE Intern. Geos. And Rem. Sens. Symp.*, Toulouse (France).
- BARSI, J. A., SCHOTT, J. R., PALLUCONI, F. D. & HOOK, S. J., 2005. Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments, *Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA. 5882
- COLL, C., GALVE, J. M., SÁNCHEZ, J. M., & CASELLES, V. 2010. Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 48(1): 547-555.
- CRISTÓBAL, J., NINYEROLA, M., & PONS, X. 2008. Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data, *Journal of Geophysical Research*. 113, D13106, doi:10.1029/2007JD009318.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., & SOBRINO, J. A. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2003JD003480. 108(D22).
- CRISTÓBAL, J., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., NINYEROLA, M., & PONS, X. 2009. Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapour and air temperature, *Journal of Geophysical Research*. 114, D08103, doi:10.1029/2008JD010616.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., & SOBRINO, J. A. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2003JD003480. 108(D22).
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., CRISTÓBAL, J., SOBRINO, J. A., SÒRIA, G., NINYEROLA, M., & PONS, X. 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47(1):339-349.
- 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.
- RAHMAN, H., & DEDIEU, G. 1994. SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum, *International Journal of Remote Sensing*. 15(1):123-143.
- SOBRINO, J. A., & RAISSOUNI, N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, *International Journal of Remote Sensing*. 21(2): 353-366.

SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., & PAOLINI, L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of Environment*. 90: 434-440.

SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.,

SÒRIA, G., ROMAGUERA, M., GUANTER, L., MORENO, J., PLAZA, A., & MARTÍNEZ, P. 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 46(2): 316-327.