

Estimación de la temperatura terrestre a partir de datos METOP-AVHRR3 mediante un algoritmo Split-Window

Land surface temperature retrieval from METOP-AVHRR3 data using a Split-Window algorithm

J. C. Jiménez-Muñoz y J. A. Sobrino
jcm@uv.es

Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia

Recibido el 02 de septiembre de 2009, aceptado el 28 de octubre de 2009

RESUMEN

En este trabajo se propone un algoritmo de tipo Split-Window (SW) que combina las bandas 4 (10.8 μm) y 5 (12 μm) para la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) a partir del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer/3 (AVHRR/3) a bordo de la plataforma MetOp-A. Los coeficientes del algoritmo SW se han obtenido a partir de una base de datos simulados, obtenida a partir del código de transferencia radiativa MODTRAN4 junto con una serie de perfiles atmosféricos extraídos de la base de datos Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR) y una serie de espectros de emisividad extraídos de la librería espectral ASTER. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del algoritmo mediante teoría clásica de errores asumiendo unos errores del 1% para la emisividad, de 0.1 K para el ruido (Noise Equivalent Delta Temperature – NE Δ T) y de 0.5 g/cm² para el contenido total en vapor de agua de la atmósfera. En este caso, el error total de la estimación de la TST es de 1.7 K. Las estimaciones de la TST con el algoritmo propuesto en este trabajo se han comparado con productos estándar como los proporcionados por los proyectos MODIS y LSA SAF (SEVIRI) sobre distintas áreas forestales. Los resultados muestran una diferencia media (AVHRR3 menos el producto) de 0.7 K para SEVIRI y 0.2 K para

ABSTRACT

In this paper we provide a Split-Window (SW) algorithm which combines bands 4 (10.8 μm) and 5 (12 μm) to retrieve Land Surface Temperature (LST) from Advanced Very High Resolution Radiometer/3 (AVHRR/3) onboard the MetOp-A platform. The coefficients involved in the SW algorithm have been calculated from a complete simulated dataset, which was obtained using MODTRAN4 radiative transfer code, atmospheric profiles extracted from the Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR) database and emissivity spectra of different natural surfaces extracted from the ASTER spectral library. A sensitivity analysis was carried out according to classical error theory by assuming an error on the surface emissivity of 1%, a Noise Delta Equivalent Temperature (N Δ ET) of 0.1 K and an error of 0.5 g/cm² for the total atmospheric water vapour content. In this case, the total error on LST retrieval is 1.7 K. LST retrievals from AVHRR/3 data using the proposed algorithm were compared to standard LST products such as the ones generated by the MODIS and LSA SAF (SEVIRI) projects over different forest areas. Results show a mean difference (AVHRR/3 minus product) of 0.7K for SEVIRI and 0.2 K for MODIS, with Root Mean Square Errors below 1.5 K in both cases.

MODIS, con Errores Cuadráticos Medios inferiores a 1.5 K en ambos casos.

PALABRAS CLAVE: temperatura, split-window, Metop, AVHRR, MODIS, SEVIRI

KEYWORDS: temperature, split-window, Metop, AVHRR, MODIS, SEVIRI

INTRODUCCIÓN

La Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), incluyendo también el caso particular de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM), es la principal variable a obtener cuando se trabaja con teledetección térmica, es decir, con datos medidos con sensores (tanto a bordo de satélites como de aviones) que poseen bandas situadas en la región del infrarrojo térmico, generalmente entre los 8 y 13 μm . La TST es una variable clave en distintos estudios de tipo medioambiental relacionados con distintas disciplinas, como geología, hidrología, ecología, oceanografía, meteorología, climatología, etc.

Durante los últimos 30 años se han publicado numerosos trabajos acerca de técnicas de obtención de la TST, siendo la técnica Split-Window (SW) una de las más utilizadas para su estimación a partir de sensores térmicos de baja resolución, en concreto aquellos que únicamente poseen dos bandas térmicas. El fundamento de la técnica SW es que la atenuación de la radiancia (o temperatura de brillo) debido a la ab-

sorción atmosférica es proporcional a la diferencia entre las radiancias (o temperaturas de brillo) medidas simultáneamente en dos longitudes de onda (bandas) distintas, y por lo tanto cada una de ellas sujetas a una absorción atmosférica distinta (McMillin, 1975). En la práctica, esto significa que podemos estimar la TST a partir de la diferencia entre las temperaturas de brillo medidas con dos bandas térmicas distintas, generalmente situadas en 11 y 12 μm . Un ejemplo de coeficientes de algoritmos SW para la estimación de la TST a partir de los datos proporcionados por los sensores de uso más frecuente para la Observación de la Tierra puede encontrarse en Jiménez-Muñoz y Sobrino (2009).

En este trabajo nos centraremos en el algoritmo SW para estimación de la TST a partir de las bandas térmicas 4 y 5 del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer/3 (AVHRR/3) ubicado en la plataforma MetOp-A. En la Figura 1 se muestra a modo de ejemplo un espectro de transmisividad atmosférica y la situación de las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR/3.

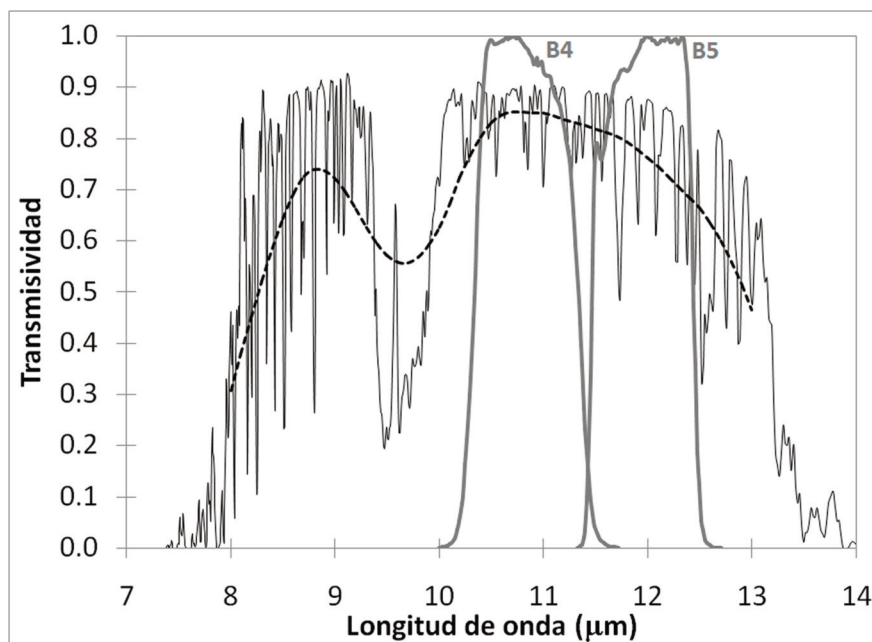


Figura 1. Transmisividad atmosférica para una atmósfera estándar de latitudes medias de verano en la región del infrarrojo térmico (8-14 μm). Se muestra también el espectro de transmisividad suavizado (línea punteada) y la respuesta espectral (función filtro) de las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR3 (líneas gruesas en color gris).

ALGORITMO SPLIT-WINDOW

El algoritmo SW considerado en este artículo presenta la misma estructura matemática que la propuesta por Sobrino *et al.* (1996), según la cual la TST viene dada por:

$$T_s = T_i + c_1 (T_i - T_j) + c_2 (T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4 W)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6 W) \Delta \varepsilon \quad (1)$$

donde T_i y T_j son las temperaturas de brillo (en K) para la bandas i y j , ε es la emisividad media, $\varepsilon = 0.5 (\varepsilon_i + \varepsilon_j)$, $\Delta \varepsilon$ es la diferencia en emisividad, $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_j)$, W es el contenido total de vapor de agua atmosférico (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) para el ángulo de observación, y c_0 a c_6 los coeficientes SW obtenidos a partir de datos de simulación. Tal y como se ha comentado en ocasiones anteriores, en el caso del sensor AVHRR/3 las bandas i y j corresponden a las bandas 4 y 5, con longitudes de onda efectivas de 10.82 y 11.97 μm , respectivamente. Nótese que en el caso de la estimación de la TSM, en la que la emisividad es conocida y por lo tanto no se considera como un parámetro de entrada, la Ec. (1) se reduce a:

$$T_s = T_i + c_1 (T_i - T_j) + c_2 (T_i - T_j)^2 + c_0 \quad (2)$$

Los coeficientes SW han sido obtenidos a partir de datos simulados generados con el código de transferencia radiativa MODTRAN4 (Beck *et al.*, 1999) utilizando 108 espectros de emisividad incluidos en la librería espectral ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov>), 61 perfiles atmosféricos incluidos en la base de datos *Thermodynamic Initial Guess Retrieval* (TIGR), cinco valores de TST (T-5, T, T+5, T+10, T+20), donde T es la temperatura del primer nivel del perfil atmosférico, y 5 ángulos de observación (0°, 10°, 20°, 30°, 40°). En el caso de la TSM, únicamente se consideraron 3 valores de TST (T-5, T, T+5) y el espectro de emisividad de agua del mar, además de los

5 ángulos de observación mencionados anteriormente.

Para obtener una estimación de los errores esperados en la obtención de la TST con el algoritmo propuesto, se ha realizado un análisis de sensibilidad basado en la teoría clásica de errores:

$$e(\text{TST}) = \sqrt{\delta_{\text{alg}}^2 + \delta_{\text{NEAT}}^2 + \delta_{\varepsilon}^2 + \delta_{\text{W}}^2} \quad (3)$$

donde $e(\text{TST})$ es el error total y δ_{alg} es el error de la estimación (obtenido al realizar el ajuste estadístico). Las contribuciones al error total debidas al ruido (δ_{NEAT}), la indeterminación en emisividad de la superficie (δ_{ε}) y del vapor de agua (δ_{W}) vienen dadas por:

$$\delta_{\text{NEAT}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_s}{\partial T_i}\right)^2 e^2(T_i) + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_j}\right)^2 e^2(T_j)} \quad (4)$$

$$\delta_{\text{NEAT}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_s}{\partial T_i}\right)^2 e^2(T_i) + \left(\frac{\partial T_s}{\partial T_j}\right)^2 e^2(T_j)} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{W}} = \left(\frac{\partial T_s}{\partial W}\right) e(W) \quad (6)$$

En el análisis de sensibilidad se ha considerado $e(T_i)=e(T_j)=0.1$ K, $e(\varepsilon_i)=e(\varepsilon_j)=0.01$ y $e(W)=0.5$ g/cm^2 . Los valores de los coeficientes SW y de los errores obtenidos en el análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 1.

	TST	TSM
c_0	-0.045	0.402
c_1	1.733	1.107
c_2	0.307	0.585
c_3	44.3	
c_4	-0.61	
c_5	-150	
c_6	18.7	
r	0.978	0.982
δ_{alg}	0.9	0.5 (0.3)
$\delta_{NE\Delta T}$	0.5	0.5 (0.4)
$\delta\epsilon$	1.4	
δ_w	0.09	
e_{total}	1.7	0.7 (0.5)

Tabla 1. Coeficientes Split-Window para la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (Ec. 1) y de la Superficie del Mar (Ec. 2) a partir de datos AVHRR/3. Se muestra también el coeficiente de correlación de Pearson (r), el error de la estimación (δ_{alg}), el error debido al ruido ($\delta_{NE\Delta T}$), el error debido a la indeterminación de la emisividad ($\delta\epsilon$), el error debido a la indeterminación del vapor de agua (δ_w) y el error total (e_{total}) obtenido en el análisis de sensibilidad. Los valores de los errores vienen dados en Kelvin. En el caso de la TSM, los errores entre paréntesis hacen referencia al caso de observación nadir.

INTERCOMPARACIÓN DE PRODUCTOS

Zonas de estudio

A pesar de que el análisis de sensibilidad mostrado en el apartado anterior proporciona una estimación rigurosa del error en las estimaciones de la TST, es importante validar el algoritmo utilizando medidas de campo, si bien la comparación de este tipo de medidas con los valores de la imagen de baja resolución no está exenta de dificultades, ya que se requiere de una zona lo suficientemente amplia y homogénea térmicamente. Es nuestra intención realizar esta tarea en un futuro. Por el momento, mostramos en este apartado los resultados obtenidos en la comparación de la TST obtenida con el algoritmo SW y datos AVHRR/3 y la TST extraída de los productos oficiales MODIS y LSA SAF, estos últimos obtenidos a partir de datos Meteosat8/SEVIRI. Nótese que los productos oficiales ya han sido objeto de numerosas validaciones a nivel global. La com-

paración se ha centrado en cuatro zonas de bosque repartidas en la Península Ibérica y Francia. Estas zonas se han elegido debido a su homogeneidad y alta cobertura vegetal, minimizando por tanto los errores que puedan cometerse debido a la indeterminación en la emisividad, ya que en este tipo de zonas el valor de la emisividad es alto y casi constante espectralmente. En particular, se ha considerado $\epsilon_i = \epsilon_j = 0.98$, y por tanto $\Delta\epsilon = 0$.

Las zonas de estudio seleccionadas son: 1) Le Bray (44.72N, -0.77E), en Burdeos (Francia), 2) Outumuro (42.22N, -8-05E), en la provincia de Orense, 3) el parque natural de “El Rodeno” (40.38N, -1.4E), en la provincia de Teruel y 4) el parque cinegético de “El Hosquillo” (40.37N, -1.94E), en la provincia de Cuenca. La situación de las zonas se muestra en la Figura 2. El análisis comparativo se ha realizado para dos fechas determinadas, el 27 de Julio de 2007 y el 4 de Julio de 2008. Utilizando como base radiosondeos cercanos a las zonas, se ha tomado como valor de vapor de agua para ambas fechas 2 g/cm² para las zonas de la Península y 3 g/cm² para la zona de Francia.



Figura 2. Zonas de estudio localizadas en la aplicación web Google Earth ©.

RESULTADOS

Para realizar la intercomparación entre los distintos productos se ha representado el ciclo diario de TST obtenido a partir de SEVIRI (ya que proporciona imágenes cada 15 minutos) y los valores puntuales obtenidos con los productos MODIS y el algoritmo SW aplicado a datos AVHRR3. En estos dos últimos casos se dispone tanto de valores diurnos como nocturnos, correspondientes aproximadamente a horas de adquisición AVHRR3 de 10:00 y 21:20 GMT. Debido a la distinta resolución espacial entre SEVIRI y AVHRR3 y MODIS, se han realizado promedios para 3×3 píxeles en estos dos últimos casos. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos para el día 27 de Julio de 2007, y la Figura 4 los obtenidos para el día 4 de Julio de 2008. En general, se observa una buena concordancia entre los 3 productos de TST, especialmente para las adquisiciones nocturnas, debido a una mayor homogeneidad térmica en comparación con condiciones diurnas. La falta de valores en 2008 para las zonas de Le Bray y Ou-

tomuro es debida a malas condiciones atmosféricas (presencia de nubes).

En las Figuras 5 y 6 se muestran las estadísticas obtenidas en la comparación SEVIRI-AVHRR y MODIS-AVHRR. Se puede observar como en el caso de la comparación con SEVIRI, el error cuadrático medio es ligeramente inferior al obtenido con MODIS, 1.1 K frente a 1.5 K, si bien el bias es inferior en el caso de la comparación con MODIS (0.2 K frente a 0.7 K). En general, ambas comparaciones proporcionan errores inferiores a 1.5 K, que es un resultado aceptable cuando se trabaja en la estimación de la TST en baja resolución. Hay que tener en cuenta además las posibles diferencias que puedan existir debido a distintas horas de paso y al problema del solapamiento de los píxeles extraídos de las imágenes adquiridas con los distintos sensores. Lógicamente estas diferencias son menores en condiciones nocturnas, como se observa en las Figuras 3 y 4, debido a una mayor homogeneidad térmica, tanto espacial como temporalmente.

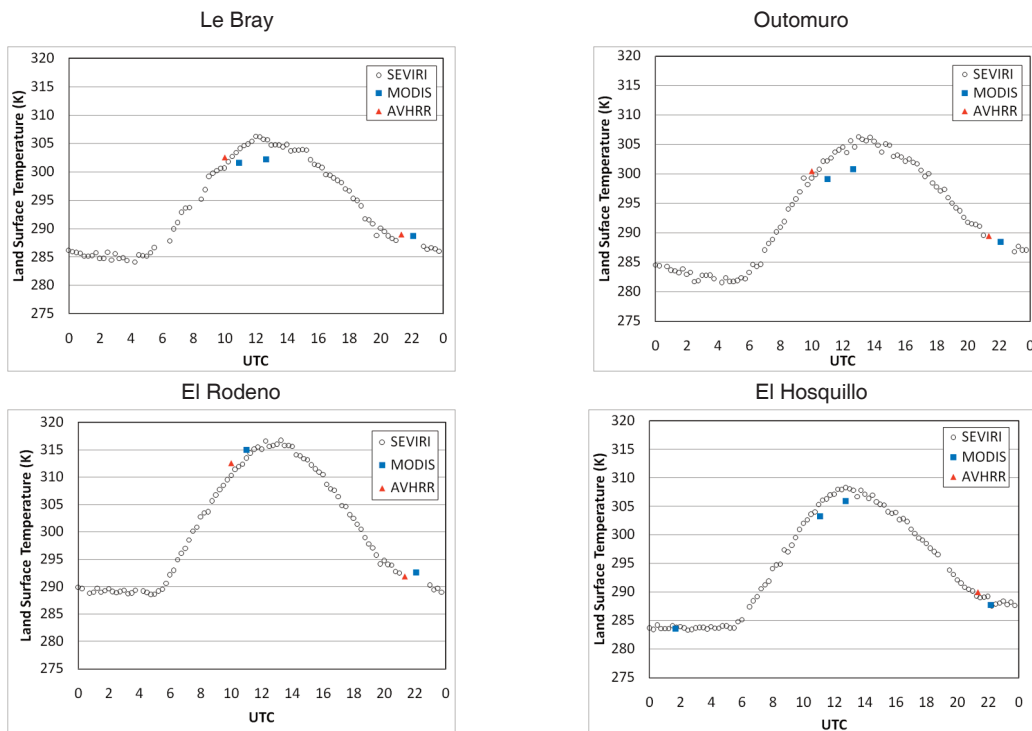


Figura 3. Intercomparación entre productos de Temperatura de la Superficie Terrestre (en inglés, *Land Surface Temperature – LST*) obtenidos con datos AVHRR3 y el algoritmo Split-Window propuesto en este trabajo y los obtenidos en los proyectos MODIS y LSA SAF (SEVIRI) para el día 27 de Julio de 2007, sobre cuatro áreas forestales (Le Bray, Outomuro, El Rodeno y El Hosquillo).

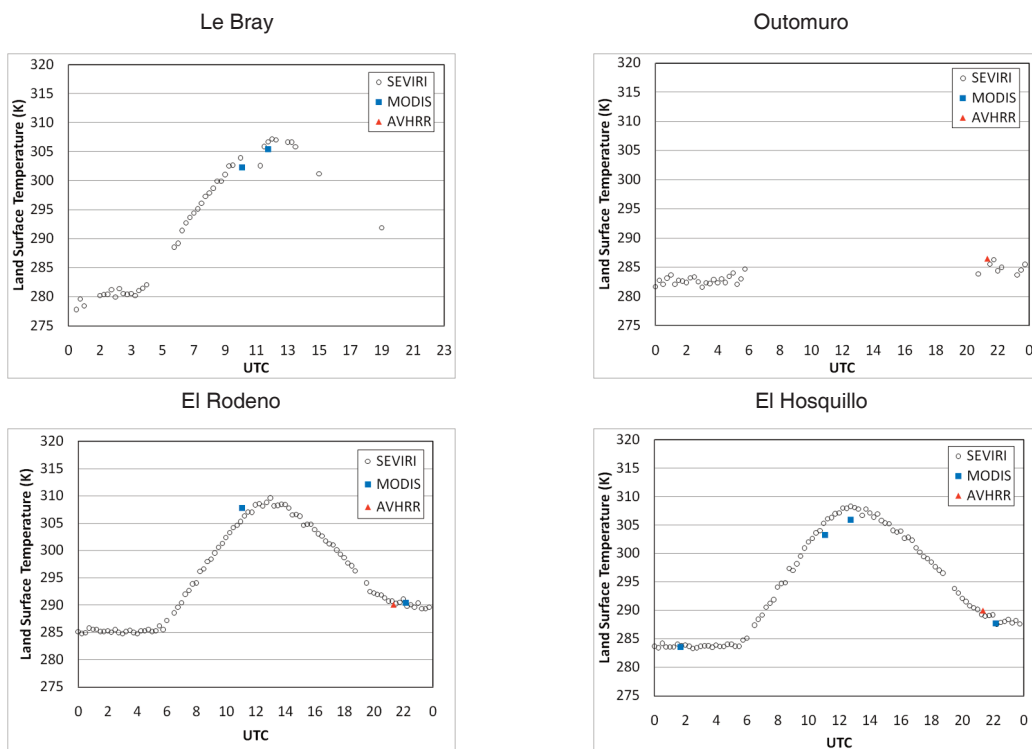


Figura 4. Similar a la Figura 3, para el día 4 de Julio de 2008.

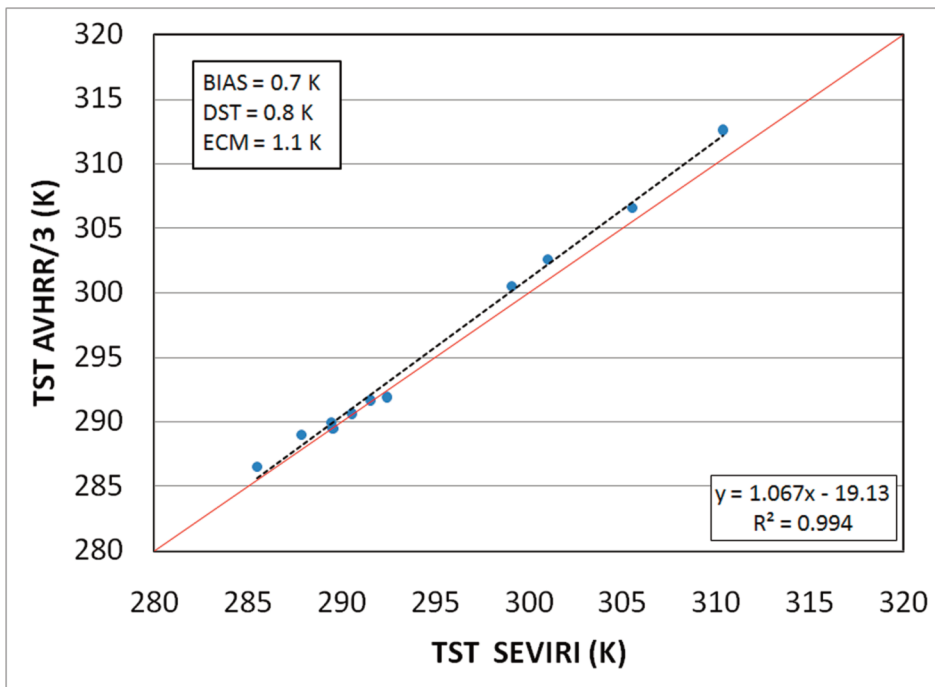


Figura 5. Comparación entre los valores de TST obtenidos con datos AVHRR/3 y el algoritmo Split-Window propuesto en este trabajo y los valores de TST extraídos del producto LSA SAF con datos SEVIRI. BIAS es el valor medio de la diferencia, DST es la desviación estándar y ECM es el error cuadrático medio.

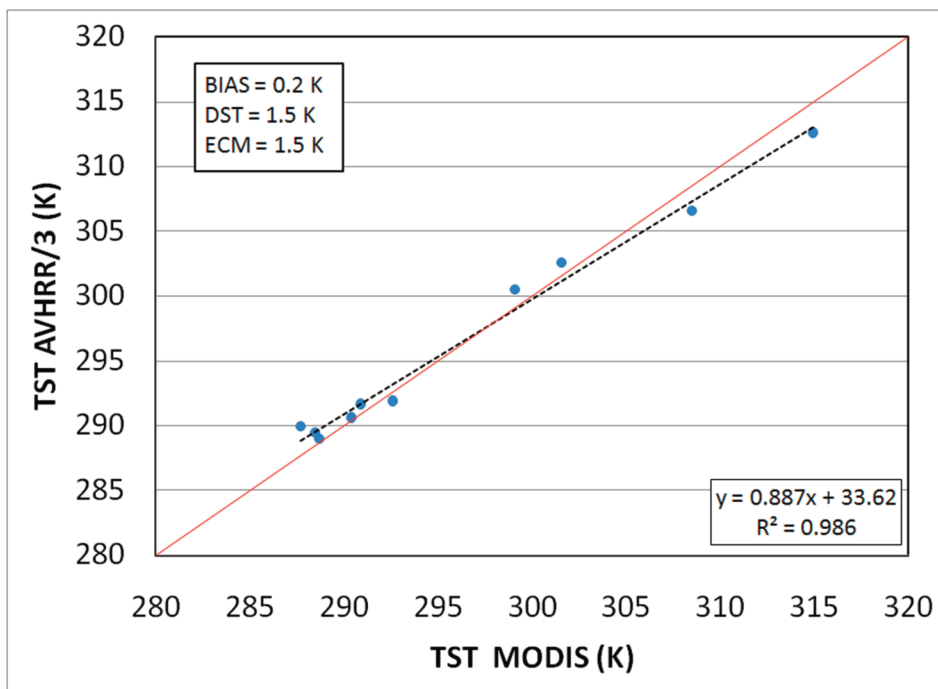


Figura 6. Similar a la Figura 5, para el producto MODIS.

GENERACIÓN DE MAPAS DE TST Y TSM

Para poder obtener imágenes de TST o TSM a partir de los datos AVHRR3 utilizando el algoritmo SW necesitamos generar previamente tanto las imágenes de las temperaturas de brillo, como las de las emisividades y el vapor de agua. En el caso de las temperaturas de brillo no existe ninguna dificultad, ya que pueden obtenerse directamente a partir de la radiancia medida por el sensor utilizando la ley de Planck. En este caso las imágenes fueron adquiridas a través del archivo de EUMETSAT en nivel 1b, por lo tanto ya incluyen los valores de radiancias. El caso de la emisividad entraña algo más de dificultad. Sin embargo, en sensores de baja resolución espectral como es el caso del AVHRR/3, las opciones se reducen básicamente a una estimación de la emisividad a partir de aproximaciones con el NDVI. Un ejemplo de estos métodos es el de umbrales del NDVI, propuesto por Sobrino y Raissouni (2000). En este trabajo, y como ejemplo preliminar, hemos considerado la siguiente expresión simplificada, en la que no se tiene en cuenta el efecto de cavidad:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{s,i}(1 - PV) + \varepsilon_{v,i}PV \quad (7)$$

siendo ε_s la emisividad del suelo y ε_v la emisividad de la vegetación para la banda i . PV es la proporción de vegetación, que se obtiene a partir del NDVI escalado (Gutman e Ignatov, 1998):

$$PV = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (8)$$

donde NDVI_s y NDVI_v son respectivamente valores representativos del NDVI para el suelo (superficies desnudas, con PV=0%) y para la vegetación (superficies totalmente cubiertas, con PV=100%).

A pesar de que una estimación óptima del NDVI debería realizarse con reflectividades de la superficie, es decir, corregidas del efecto atmosférico, al tratarse de un índice normalizado y posteriormente escalarse para obtener la PV, en primera aproximación podría realizarse en radiancias medidas por el sensor, que es la aproximación considerada para el ejemplo mostrado en este apartado. Los valores de NDVI_s y NDVI_v se han obtenido a partir del histograma del NDVI (0.2 y 0.8 respectivamente, en este caso). Los valores seleccionados para la emisividad del suelo han sido de 0.95 para la banda 4 y 0.96 para la banda 5, tal y como se propone en Sobrino y Raissouni (2000). Para la emisividad de la vegetación se ha considerado un valor constante de 0.99.

Por lo que respecta al vapor de agua, existen métodos para generar esta variable píxel a píxel, como por ejemplo el método Split-Window Covariance-Variance Ratio (SWCVR) (Sobrino *et al.* 1994). Para este caso preliminar se ha elegido un valor de vapor de agua nominal para la Península de 2 g/cm², tal y como se señaló en el apartado anterior de resultados.

La Figura 7 muestra un ejemplo de la órbita completa MetOp/AVHRR3, resaltando la zona de la Península Ibérica mediante una composición RGB. En la Figura 8 se muestra la imagen de PV obtenida, y finalmente en la Figura 9 se muestra los productos de TST y TSM, obtenidos según lo discutido en este apartado.

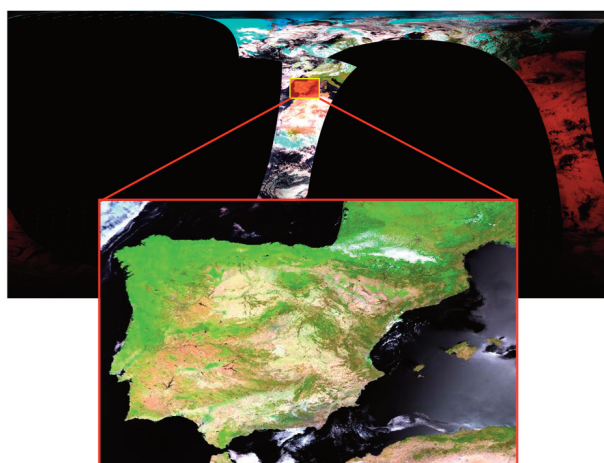


Figura 7. Órbita completa del sensor AVHRR/3 a bordo de la plataforma MetOp-A, y composición RGB (bandas 3,2,1) para la zona de la Península Ibérica. La imagen corresponde al día 27 de Julio de 2007, sobre las 10:00 GMT.

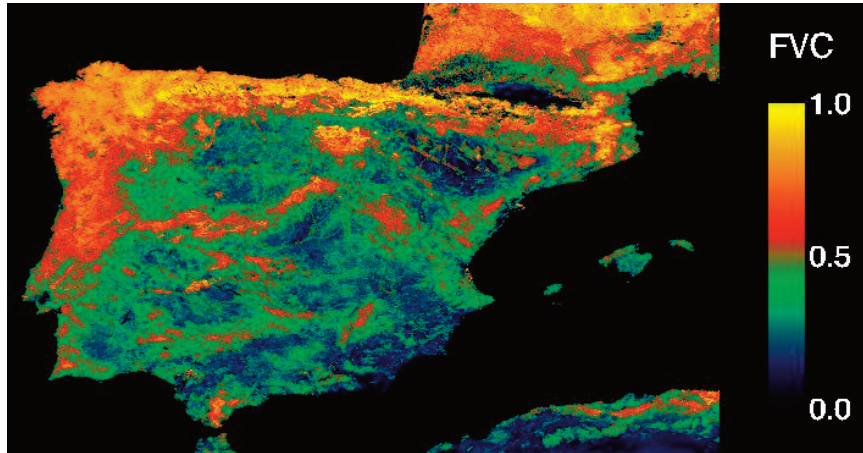


Figura 8. Imagen de Proporción de Vegetación (en inglés, Fractional Vegetation Cover – FVC) obtenida a partir del NDVI escalado. La imagen corresponde al día 27 de Julio de 2007, sobre las 10:00 GMT.

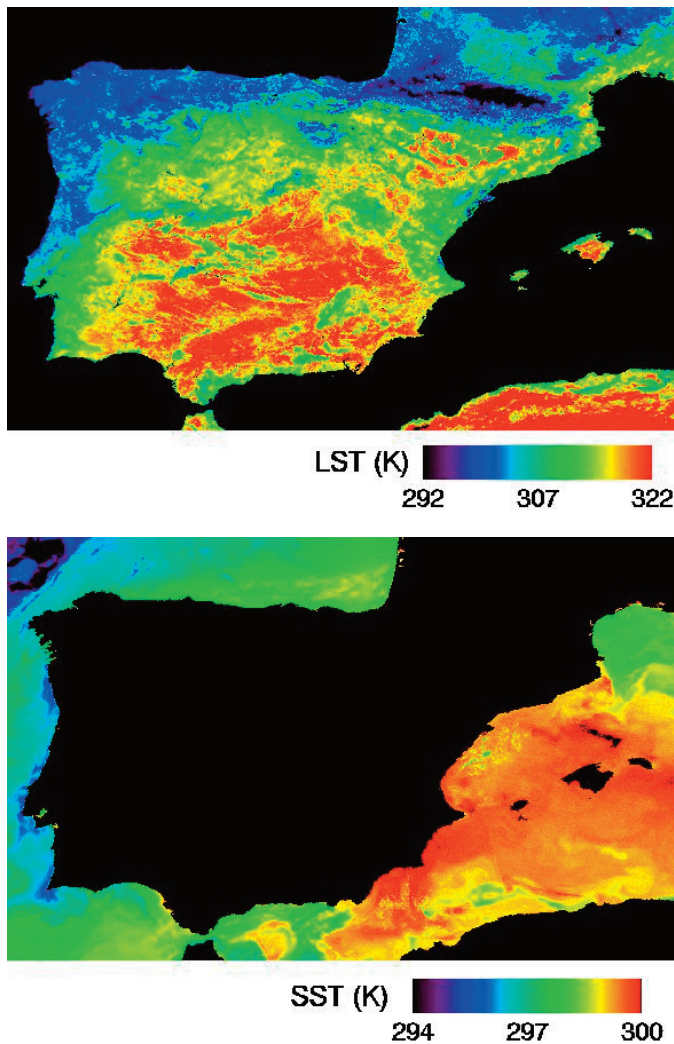


Figura 9. Imágenes de Temperatura de la Superficie Terrestre (en inglés, *Land Surface Temperature* – LST) y de la Superficie del Mar (en inglés, *Sea Surface Temperature* – SST) obtenidas con el algoritmo Split-Window propuesto en este trabajo. Las imágenes corresponden al día 27 de Julio de 2007, sobre las 10:00 GMT.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un algoritmo de tipo Split-Window con una base física para su aplicación a los datos proporcionados por el sensor AVHRR/3 a bordo de la plataforma MetOp-A. El algoritmo corrige tanto los efectos de la emisividad como los del vapor de agua, e incluye los casos de tierra y mar. Además, es un algoritmo totalmente operacional.

Se ha realizado una intercomparación con otros productos existentes (MODIS y SEVIRI) para dos fechas particulares y sobre cuatro zonas de bosque denso. Los resultados han mostrado un buen acuerdo entre los tres productos (AVHRR3, MODIS y SEVIRI), con errores en dicha intercomparación inferiores a 1.5 K.

También se ha mostrado un ejemplo preliminar para generar mapas tanto de TST como de TSM. En el caso terrestre, los mapas de emisividad se han obtenido a partir de la estimación de la proporción de vegetación, a su vez obtenida a partir del NDVI escalado.

En el futuro se pretende mejorar el procesado de las imágenes MetOp/AVHRR (corrección atmosférica), así como validar el algoritmo SW en otras zonas y utilizando medidas de campo.

REFERENCIAS

BECK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., CHETWYND, J. H., BERNSTEIN, L. S., SHETTLE, E. P., MATTHEW, M. W., ADLER-GOLDEN, S. M., 1999. *MOD-*

TRAN4 User's Manual, Air Force Research Laboratory, Hanscom AFB, MA.

GUTMAN, G., IGNATOV, A., 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models, *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1533-1543.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., 2009. Split-window coefficients for land surface temperature retrieval from low-resolution thermal infrared sensors, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4), 806-809.

McMILLIN, L. M., 1975. Estimation of Sea Surface Temperatures From Two Infrared Window Measurements, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. 36, 5113-5117.

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*, 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, *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2089-2114.

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.