

Algoritmo de estimación de la temperatura de la superficie terrestre con el Msg2: test y comparación con datos In Situ y productos MODIS y LANDSAF

Algoritmo de estimación de la temperatura de la superficie terrestre con el Msg2: test y comparación con datos In Situ y productos MODIS y LANDSAF

M. Atitar, J.A. Sobrino, J.C. Jiménez, R. Oltra, Y. Julien, G. Sòria, A. Ruescas, V.Hidalgo,
B. Franch y C. Mattar
Mariam.atitar@uv.es

*Departamento de Tierra, Física y Termodinámica, Universidad de Valencia, Burjassot,
46100, Valencia. España*

Recibido el de 2008 , aceptado el de 2008

RESUMEN

El objetivo principal de este artículo es desarrollar un algoritmo operacional para la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) usando los canales del visible y del infrarrojo térmico del sensor Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) instalado a bordo del segundo satélite de la serie Meteosat Second Generation (MSG2, también conocido como Meteosat 9). El algoritmo está basado en el método Split-Window y utiliza dos canales del infrarrojo térmico (IR10.8 e IR12.0). Se ha utilizado el código de transferencia radiativa MODTRAN 4.0 para obtener los coeficientes numéricos del algoritmo propuesto. Los resultados muestran que el algoritmo es capaz de estimar la TST con una desviación estándar de 0.7 K y con un Error Cuadrático Medio (ECM) de 1.3 K, para un ángulo cenital de observación inferior a 50°. El algoritmo se ha aplicado a una serie de imágenes MSG2 adquiridas con un sistema de recepción de datos MSG instalado en el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (IPL: Imaging Processing Laboratory) de la Universidad de Valencia. El producto TST se ha validado

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to give an operational algorithm for retrieving the Land Surface Temperature (LST) using the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) data onboard the Meteosat Second Generation (MSG2)/ Meteosat 9 Satellite. The algorithm is a split window method using the two thermal infrared channels (IR10.8 and IR12.0). MODTRAN 4.0 code was used to obtain numerical coefficients of the algorithm proposed. The results show that the algorithm is capable to produce LST with a standard deviation of 0.7 K and a Root Mean Square Error (RMSE) of 1.3 K, both of them for viewing angles lower than 50°. The algorithm has been applied to a series of MSG2 images obtained from a MSG antenna system installed at the Imaging Processing Laboratory (IPL) in the University of Valencia. The LST product has been validated using in situ data collected in the framework of an European Space Agency (ESA) field campaign named CEFLES2 (CarboEurope, FLEx and Sentinel-2) carried out in 2007 in Bordeaux (France). LST retrievals have been also compared against Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LANDSAF) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products

a partir de datos in situ obtenidos durante la campaña de medidas CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Setinel-2) de la Agencia Espacial Europea (ESA: European Space Agency). También se ha realizado una comparación con productos del proyecto Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LANDSAF) así como productos del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Los resultados muestran un ECM de 1.5 K en la comparación con productos MODIS y de 0.9 K en la comparación con productos LANDSAF.

PALABRAS CLAVE: : Temperatura de Superficie terrestre, Meteosat second generation (MSG), Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), Split window (SW), LANDSAF (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

over different surfaces and under different viewing angles. The results show a RMSE of 1.5K when compared to MODIS LST products, and 0.9 K when compared to LANDSAF products.

KEYWORDS: Land Surface Temperature (LST), Meteosat Second Generation (MSG), Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), Split Window (SW), LANDSAF (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

INTRODUCCIÓN

El satélite Meteosat de Segunda Generación (Meteosat Second Generation, MSG) fue desarrollado conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA) y EUMETSAT. El satélite Meteosat 9 es el último de la serie MSG2, y fue lanzado en diciembre de 2005. Es un satélite geostacionario cuyo principal sensor es el SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Este sensor detecta la radiación en 12 canales espectrales: tres en el visible, ocho en el infrarrojo medio y térmico y un canal en el visible de banda ancha y de alta resolución HRV (High Resolution Visible). Los tres canales del visible e infrarrojo próximo se centran en las longitudes de ondas de 0.6, 0.8 y 1.6 μm , y los ocho canales del infrarrojo medio y térmico se centran en 3.9, 6.2, 7.3, 8.7, 9.7, 10.8, 12.0 y 13.4 μm , y finalmente el canal HRV se centra en 0.5-0.9 μm . El rango dinámico máximo para los canales 10.8 y 12.0 es de 335K según Eumetsat, 2006. Una de las ventajas más importantes del MSG2 es la resolución temporal (15 minutos), lo que permite una cobertura diaria de imágenes en comparación con los satélites polares. Todas estas características hacen de SEVIRI un sensor muy importante para la estimación de la TST.

En este artículo, proponemos un nuevo algoritmo split-window para estimar la TST a partir de los datos proporcionados por los canales IR10.8 e IR12.0 del SEVIRI/MSG. El algoritmo tiene en

cuenta la dependencia con el ángulo de observación de SEVIRI.

Los coeficientes del algoritmo split-window se obtienen a partir de datos simulados con el código de transferencia radiativa Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model (MODTRAN, versión 4.0) (Abreu y Anderson, 1996; Berk *et al.* 1998)

ALGORITMO SPLIT WINDOW

La estructura del algoritmo se obtiene mediante la ecuación de transferencia radiativa aplicada a la región del infrarrojo térmico, según la cual la radiación $B(T_{i\theta})$ medida a nivel del sensor para un canal dado i y bajo el ángulo de observación cenital θ viene expresada de acuerdo con la ecuación 1:

$$B(T_{i\theta}) = \epsilon_{i\theta} B_i(T_s) \tau_{i\theta} + R_i(\text{ref}) \tau_{i\theta} + R_{at\theta} \quad (1)$$

el primer término representa la emisión de superficie atenuada por la atmósfera, donde, $\epsilon_{i\theta}$ es la emisividad de la superficie, $B_i(T_s)$ es la radiancia emitida por un cuerpo negro a una temperatura T_s de superficie, $\tau_{i\theta}$ es la transmisividad total atmosférica y $R_i(\text{ref})$ es la radiancia atmosférica reflejada dada por la ecuación 2. En ella, $R_{i\text{hem}}$ es la radiancia atmosférica descendente procedente de todo el hemisferio en el canal i , y que puede ser obtenida directamente

de las simulaciones con MODTRAN4.0 junto con la radiación atmosférica ascendente R_{atm}^{\uparrow} .

$$R_i(ref) = R_{ism}^{\downarrow} (1 - \varepsilon_{is}) \quad (2)$$

El método split-window consiste en combinar los datos obtenidos simultáneamente por los dos canales del sensor en la misma ventana atmosférica, en los cuales la absorción de la radiación por parte de la atmósfera es distinta, al tratarse de dos longitudes de onda diferentes. Evaluando tales absorciones, es posible obtener la radiación absorbida por parte de la atmósfera. En este artículo, hemos considerado el siguiente algoritmo (Ecuación 3) para estimar la TST, dado por (Sobrino *et al.* 1996), y adaptado luego a las características del sensor SEVIRI:

$$T_s = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_3(1 - \varepsilon) + \alpha_4W(1 - \varepsilon) + \alpha_5\Delta\varepsilon + \alpha_6W\Delta\varepsilon + \alpha_0$$

Donde: T_s es la temperatura de la superficie TST (en K), T_i y T_j son las temperaturas radiométricas medidas por el sensor en dos canales térmicos de SEVIRI (en K), ε es la emisividad media: $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$, $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de emisividades: $\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$, W es el contenido total en vapor de agua de la atmósfera (en g.cm⁻²) en la dirección de observación del sensor, y α_i son los coeficientes numéricos del algoritmo, obtenidos con simulaciones de MODTRAN.

METODOLOGÍA

A. Simulación de datos

Como hemos indicado antes, MODTRAN 4.0 ha sido utilizado para extraer los coeficientes del algoritmo y analizar los efectos atmosféricos. Para llevar a cabo esta tarea, se han utilizado dos bases de datos de radiosondeos: la primera comprende 61 radiosondeos de observaciones extraídos de la base de datos "TOVS initial guess retrieval (TIGR)" de acuerdo con (Scott y Chedin, 1981), y la segunda los perfiles atmosféricos estándar incluidos en MODTRAN 4.0 para latitudes medias en verano, latitudes medias en invierno, tropical, subártico en verano y subártico en invierno.

Considerando la variación angular de SEVIRI, las simulaciones se han realizado con 7 ángulos de observación cenital (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°)

Otro parámetro importante en estas simulaciones es la emisividad, y debido a la falta de medidas angulares de emisividad, hemos seleccionado 108 muestras naturales de los espectros de emisividad de la librería espectral de ASTER. Para cada canal térmico, los valores de emisividad se obtuvieron mediante la integración de la función filtro de respuesta, con la emisividad del espectro.

Como resultado, hemos obtenido 46116 situaciones diferentes (61 atmósferas, 7 ángulos y 108 espectros de emisividad) que se utilizaron para cada canal térmico con el fin de obtener los coeficientes de regresión lineal del algoritmo. Los valores de emisividades oscilan entre 0.7 y 0.99, el vapor de agua atmosférico fue extraído a partir de los 61 radiosondeos en dirección nadir y se encuentra comprendido entre 0 y 6 g.cm⁻², y los valores de la temperatura del aire en la primera capa de la atmósfera entre 244 y 310 K.

B. Datos MSG2

Los datos MSG2 utilizados en este trabajo se han adquirido en el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes IPL de la Universidad de Valencia. Más detalles acerca de la corrección radiométrica y los datos de calibración están en el apéndice. Con el fin de minimizar el efecto de niebla, se ha utilizado el método desarrollado por (Saunders y Kriebel, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Coeficientes del algoritmo

En esta sección presentamos el algoritmo TST final y el análisis de su sensibilidad. Con el fin de obtener los valores numéricos de los coeficientes, en la ecuación (3) se han utilizado los resultados de las simulaciones con MODTRAN y los espectros de emisividad. En la tabla 1 se muestran los resultados de la utilización del método de mínimos cuadrados para calcular la desviación estándar y escoger la mejor combinación de los dos canales térmicos de SEVIRI. A partir de esta tabla, la mejor combinación de los dos canales térmicos de SEVIRI viene dada por los canales IR10.8 e IR12.0 ya que suponen el valor mínimo de desviación estándar, 0.35 K en dirección nadir y 1.6 K bajo un ángulo de visión de 60°.

Por otra parte, la Tabla 2 muestra los coeficientes del algoritmo TST usando los dos canales IR10.8 e IR12.0 en función del ángulo de visión cenital.

| Ca. i | Ca. j | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| IR 8.7 | IR 10.8 | 1.424 | 1.438 | 1.484 | 1.567 | 1.712 | 1.937 | 3.034 |
| IR 8.7 | IR 12.0 | 1.048 | 1.059 | 1.093 | 1.158 | 1.278 | 1.53 | 2.772 |
| IR 10.8 | IR 12.0 | 0.348 | 0.354 | 0.375 | 0.416 | 0.5 | 0.69 | 1.608 |

Tabla 1. Desviación estándar (K) del algoritmo TST usando cuatro canales térmicos del SEVIRI en combinaciones de dos y en función de 7 ángulos de observación cenital

| θ (°) | a_1 | a_2 (K ⁻¹) | a_3 (K) | a_4 (cm ² .K.g ⁻¹) | a_5 (K) | a_6 (cm ² .K.g ⁻¹) | a_0 (K) |
|--------------|-------|-----------------------------|--------------|--|--------------|--|--------------|
| 0 | 1.21 | 0.36 | 49.28 | -4.23 | -105.05 | 15.06 | 0.23 |
| 10 | 1.21 | 0.37 | 49.11 | -4.13 | -105.03 | 14.85 | 0.24 |
| 20 | 1.20 | 0.38 | 48.56 | -3.83 | -105.00 | 14.23 | 0.27 |
| 30 | 1.18 | 0.40 | 47.45 | -3.29 | -105.12 | 13.25 | 0.33 |
| 40 | 1.16 | 0.44 | 44.69 | -2.33 | -105.44 | 11.96 | 0.45 |
| 50 | 1.20 | 0.47 | 39.57 | -1.02 | -108.74 | 10.87 | 0.66 |
| 60 | 0.85 | 0.60 | 18.72 | 3.30 | -55.03 | 1.57 | 2.00 |

Tabla 2. Coeficientes numéricos del algoritmo TST

B. El algoritmo propuesto

Con el fin de obtener un algoritmo global de la TST, hemos ajustado los coeficientes de la tabla 2 en función del coseno del ángulo de observación cenital θ . La comparación con diferentes formas del ajuste lineal da un mejor coeficiente de correlación (~ 1) usando $1/\cos^2(\theta)$ como variable en cada término del algoritmo propuesto. La ecuación (4) da la estructura física del algoritmo propuesto para obtener la TST a partir de datos SEVIRI/MSG2:

$$\begin{aligned}
 T_s = & T_{IR10.8} + \left[1.34 - \frac{0.11}{\cos^2(\theta)} \right] (T_{IR10.8} - T_{IR12.0}) + \\
 & + \left[0.29 + \frac{0.08}{\cos^2(\theta)} \right] (T_{IR10.8} - T_{IR12.0})^2 + \\
 & + \left[60.67 - \frac{10.01}{\cos^2(\theta)} \right] (1 - \varepsilon) + \left[-6.71 + \frac{2.47}{\cos^2(\theta)} \right] W(1 - \varepsilon) + \\
 & + \left[-125.91 + \frac{15.09}{\cos^2(\theta)} \right] \Delta \varepsilon + \left[19.44 - \frac{4.27}{\cos^2(\theta)} \right] W \Delta \varepsilon + \\
 & + \left[-0.44 + \frac{0.57}{\cos^2(\theta)} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Los valores necesarios para el cálculo de la TST, como el vapor de agua se obtiene siguiendo a (Schroedter-Homscheidt *et al*, 2004a) y (Sobrinoy Romaguera, (2008)), el valor de la emisividad se ha calculado utilizando el método de umbrales desarrollado en (Sobrinoy *et al*, 2001) y adaptado en este caso a SEVIRI. Por otra parte, un algoritmo de tipo split-window para MSG1 fue desarrollado por Sobrinoy Romaguera (2004), con una desviación estándar de 1.5 K para ángulos inferiores a 50°. En este artículo se pretende comparar este último algoritmo con el que hemos propuesto. La propuesta de un nuevo algoritmo para el MSG2 viene debida al cambio en las respuestas espectrales de los canales térmicos de SEVIRI para MSG1 y MSG2, especialmente para el canal IR12.0, más detalles en (Eumet-sat, 2006).

C. Análisis de sensibilidad:

Para obtener la precisión en la estimación de la TST, la tabla 3 muestra la estimación de errores de cada término del algoritmo y los errores totales obtenidos a partir de la base de datos para cada ángulo de observación θ

$$(\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{sd}^2 + \sigma_{ruido}^2 + \sigma^2 \epsilon + \sigma^2 \tau})$$

donde σ_{total} es el error total de la simulación de toda la base de datos (en K), σ_{sd} es el error estándar de la estimación (en K), σ_{ruido} es el error debido a la incertidumbre del ruido equivalente a la delta de temperatura (en K), σ_{ϵ} es el error debido a la incertidumbre en los valores de la emisividad (en K), σ_{τ} es el error debido a la incertidumbre en el valor del contenido total en vapor de agua atmosférico (en K) y r es el coeficiente de correlación, una explicación detallada del análisis de sensibilidad puede encontrarse en (Sobrino *et al*, 2004). Los valores típicos de incertidumbre escogidos son: $\pm 0.01 \pm 0.005$ para valores de emisividad, $\pm 0.5 \text{ g.cm}^{-2}$ para el contenido total en vapor de agua atmosférico, y 0.07 y 0.1K para el ruido equivalente a la delta de temperatura (ΔT) para los canales IR 10.8 y IR12.0 respectivamente, de acuerdo con (Eumetsat, 2007 b).

COMPARACIONES Y EVALUACIONES

A. COMPARACIÓN CON DATOS IN SITU

La evaluación de la TST a partir de datos SEVIRI se ha llevado a cabo utilizando datos in situ obtenidos mediante una campaña de medidas realizada en Burdeos (Francia) (44°43'01.7"N, 0°46'09.8"O).

Desde el 26 de abril de 2007, dos radiómetros (Raytek (R) y Everest (Ev)) han sido instalados en una torre de 33 metros de altura, en la zona forestal de Le Bray (Burdeos). Los dos radiómetros están orientados en dirección nadir con un campo de visión (FOV: field of view), de 6° y 4°, respectivamente, tienen una sola banda de 8-14 μm y miden cada 5 minutos.

La fecha seleccionada para comparar la TST es el

27 de julio de 2007, un día despejado y sin nubes. La TST se comparó con los datos in situ. La ecuación de transferencia radiativa (Ecuación 1) se ha utilizado para calcular la temperatura de superficie a partir de los dos radiómetros, donde la radiación atmosférica descendente se calculó utilizando el código MODTRAN4.0 y el producto MODIS del perfil atmosférico (MOD07_L2) para el día seleccionado. El valor de emisividad considerado para esta zona de bosque es de 0.98. La Figura 1 muestra los resultados del algoritmo propuesto en este artículo, en comparación con las temperaturas obtenidas a partir de la temperatura de brillo de los dos radiómetros (R) y (EV), y también, la TST calculada utilizando el algoritmo desarrollado para el MSG1 (Sobrino y Romaguera, 2004). Esta comparación incluye 96 imágenes SEVIRI, adquiridas cada 15 minutos, durante el día seleccionado. Las medidas efectivas de los radiómetros fueron promediadas cada 15 minutos con el fin de compararlas con los valores de la TST del SEVIRI.

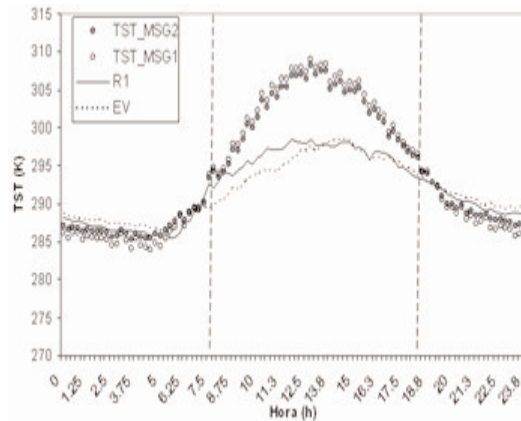


Figura 1. Valores de la TST usando algoritmos para MSG1 y MSG2, y la TST calculada a partir de los datos de los dos radiómetros RAYTEK y el Everest, durante el día 27 de julio de 2007

| $\theta(^{\circ})$ | σ_{sd} | r | σ_{ruido} | σ_{ϵ} | σ_{τ} | σ_{total} |
|--------------------|---------------|-------|------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| 0° | 0.348 | 0.983 | 0.372 | 0.972 | 0.12 | 1.103 |
| 10° | 0.354 | 0.982 | 0.374 | 0.971 | 0.118 | 1.105 |
| 20° | 0.375 | 0.982 | 0.381 | 0.968 | 0.111 | 1.112 |
| 30° | 0.416 | 0.98 | 0.394 | 0.965 | 0.101 | 1.127 |
| 40° | 0.5 | 0.976 | 0.416 | 0.96 | 0.083 | 1.162 |
| 50° | 0.69 | 0.965 | 0.446 | 0.965 | 0.064 | 1.269 |
| 60° | 1.608 | 0.869 | 0.459 | 0.734 | 0.037 | 1.826 |

Tabla 3. Estimación de los diferentes errores y el error total obtenido por la base de datos de simulaciones en función del ángulo de observación cenital

La tabla 4 muestra la comparación entre las temperaturas dadas por los datos in situ y las TSTs dadas por el algoritmo propuesto y el algoritmo para el MSG1. En el caso del algoritmo propuesto, por la tarde y por la noche, el error cuadrático medio ECM es inferior a 1.9K, pero durante el día el ECM alcanza los 7.6 K. Esto se debe al factor de escala entre la superficie cubierta por los radiómetros (16mx16m) y el tamaño del píxel SEVIRI (3kmx3km), lo que provoca que las medidas de los radiómetros sean menos representativas en las horas centrales del día, cuando existe una alta heterogeneidad térmica, lo que explica la diferencia entre las medidas in situ y la TST del SEVIRI durante el día entre 8h30 y 18h15 UTC. El mismo problema aparece usando el algoritmo para el MSG1 pero con un gran ECM. A continuación, se incluye una segunda comparación utilizando productos oficiales de TST para MODIS y LANDSAF.

B. COMPARACIÓN CON MODIS Y LANDSAF

Con el fin de comprobar la influencia tanto en latitud como en longitud, así como el tipo de superficie, el algoritmo propuesto en este artículo se comparó con el producto oficial de MODIS: MOD11_L2, y el producto oficial de LANDSAF que usa imágenes del MSG2 (LANDSAF, 2006).

El día seleccionado para comparar la TST es el 27 de Julio de 2007. La comparación se llevó a cabo en cuatro zonas homogéneas diferentes, a las 11:00 UTC, en zonas de 3x3 píxeles MODIS promediadas a 1 píxel SEVIRI, con un porcentaje de superposición de cobertura alrededor del 70% del píxel SEVIRI, y dependiendo de la geometría de visión angular, este porcentaje debería, como mínimo, cubrir el 50% de la zona estudiada según (Erwin *et al*, 2007). La Figura 2 muestra la imagen TST obtenida a partir de datos SEVIRI con las cuatro áreas esco-

gidas para la comparación, en la tabla 5 se muestra la diferencia de la TST calculada con los dos algoritmos del MSG1 y MSG2 y los productos oficiales de MODIS y LANDSAF en las cuatro zonas escogidas y bajo distintos ángulos de visión.

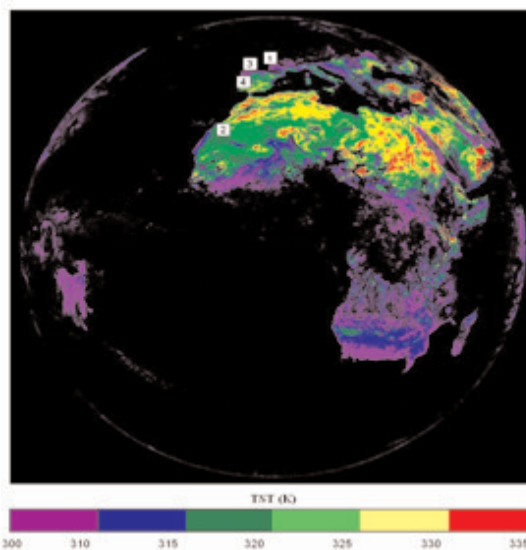


Figura 2. Imagen de la TST del SEVIRI para el día 7 de julio de 2007, a las 11:00 UTC, y las zonas de evaluación del algoritmo propuesto

Como muestra la tabla 5, la diferencia entre la TST estimada con el algoritmo propuesto para el MSG2 y los productos MODIS y LANDSAF da, en ambos casos, un ECM inferior comparado con el algoritmo para MSG1.

La evaluación del algoritmo propuesto con el producto MODIS da un ECM de 1.5K; en el caso del producto LANDSAF esta diferencia es del orden de 0.9K.

| Hora (h) | MSG1 | | MSG2 | |
|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | $T_{SEVIRI} - T_{RI}$ (K) | $T_{SEVIRI} - T_{EV}$ (K) | $T_{SEVIRI} - T_{RI}$ (K) | $T_{SEVIRI} - T_{EV}$ (K) |
| 0-8h30 | 1.58 | 2.53 | 1.02 | 1.88 |
| 8h45-18h15 | 7.47 | 8.47 | 6.65 | 7.65 |
| 18h30-23h45 | 1.88 | 2.43 | 1.13 | 1.67 |

Tabla 4. Valores del ECM de la comparación entre la TST, calculada utilizando los algoritmos para MSG1 y MSG2, y la TST extraída y calculada a partir de los datos de los radiómetros RAYTEK (R) y Everest (EV) durante el día 27 de julio de 2007

| Zona | Latitud | Longitud | Angulo de visión | | Producto MODIS | | Producto LANDSAF | | |
|-------------------------|----------------|---------------|------------------|-----------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| | | | SEVIRI (°) | MODIS (°) | T_{MSG1}^{MODIS} (K) | T_{MSG2}^{MODIS} (K) | $T_{MSG1}^{LANDSAF}$ (K) | $T_{MSG2}^{LANDSAF}$ (K) | |
| 1. Le Bray (Francia) | 44°43' 6.6"N | 22.96"O | 51 | 10 | -2.66 | -1.67 | -0.98 | 0.01 | |
| 2. Desierto (Marruecos) | 25°17' 54.9"N | 13°10' 21.1"O | 33 | 55 | 0.19 | -1.63 | 1.3 | 0.94 | |
| 3. Vegetación (España) | 42°21' 50.2"N | 5°48' 18.8"O | 49 | 37 | -1 | -0.16 | -0.36 | 0.48 | |
| 4. Dehesa (España) | 38°50' 46.22"N | 6°52' 58.5"O | 45 | 38 | 0.58 | 1.23 | 0.69 | 1.34 | |
| | | | | | Bias (K) | -0.72 | -0.56 | 0.16 | 0.69 |
| | | | | | σ (K) | 1.46 | 1.38 | 1.02 | 0.57 |
| | | | | | ECM (K) | 1.63 | 1.49 | 1.04 | 0.9 |

Tabla 5. Valores de la diferencia, la desviación estándar (σ) y el ECM obtenidos a partir de la diferencia entre los TST de los dos algoritmos para MSG1 y MSG2, y los productos MODIS y LANDSAF en cuatro áreas diferentes y bajo diferentes ángulos de visión

Como el producto LANDSAF utiliza imágenes del MSG2, tenemos un amplio rango de datos y cobertura temporal para hacer una comparación más rigurosa con el algoritmo propuesto para el MSG2. De hecho, la figura 3 ilustra 5 gráficas de diferentes zonas geográficas en las cuales comparamos la TST calculada con el algoritmo propuesto y el producto LANDSAF a lo largo del día 27 de julio de 2007. Además, la tabla 6 muestra la diferencia entre las TSTs, y el error cuadrático medio.

A partir de la tabla 6, la diferencia entre el algoritmo propuesto y el producto LANDSAF genera un ECM que varía entre 0.9K en zonas homogéneas, como el desierto, y alcanza 2K en zonas urbanas, donde hay mayor heterogeneidad térmica.

En las dos comparaciones con MODIS y LANDSAF, las diferencias de la TSTs se deben básicamente al método de estimación de la emisividad. En

nuestro caso, el método utilizado es el de umbrales, este método se basa en los valores del Índice diferencial de vegetación normalizado: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculado en el mismo momento que la TST. En el caso de los productos MODIS y LANDSAF, se usa el método de clasificación de suelo, según (Snyder *et al*, 1998), este método utiliza un mapa anual de la cobertura terrestre (producto MOD12Q1 en el caso de MODIS y el producto Land Cover en caso de LANDSAF). Además, en el caso de MODIS, la resolución espacial de los dos sensores y el ángulo de visión influyen bastante en los resultados de la comparación. Dichos resultados muestran una de las ventajas más importantes del algoritmo propuesto que es la operatividad, ya que se puede utilizar fácilmente y no requiere un reconocimiento a priori de los tipos de la superficie.

| Zona | Latitud | Longitud | Bias (K) | σ (K) | ECM (K) |
|--------------------------------|---------------|---------------|----------|--------------|---------|
| 1. Bosque (Burdeos-Francia) | 44°43'6.6"N | 0°45'23"O | 0.92 | 1.03 | 1.38 |
| 2. Desierto (Sahara-Marruecos) | 25°17'54.99"N | 13°10'21.16"O | 0.22 | 0.91 | 0.94 |
| 3. Vegetación (Galicia-España) | 43°16'40.8"N | 8°24'37.4"O | 0.25 | 0.60 | 0.65 |
| 4. Dehesa (Badajoz-España) | 38°50'46.22"N | 6°52'58.5"O | -1.02 | 1.06 | 1.47 |
| 5. Urbana (Madrid-España) | 40°29'12.75"N | 3°43'55.96"O | -1.11 | 1.65 | 1.99 |

Tabla 6. Comparación entre la TST calculada con el algoritmo propuesto para el MSG2 y el producto LANDSAF

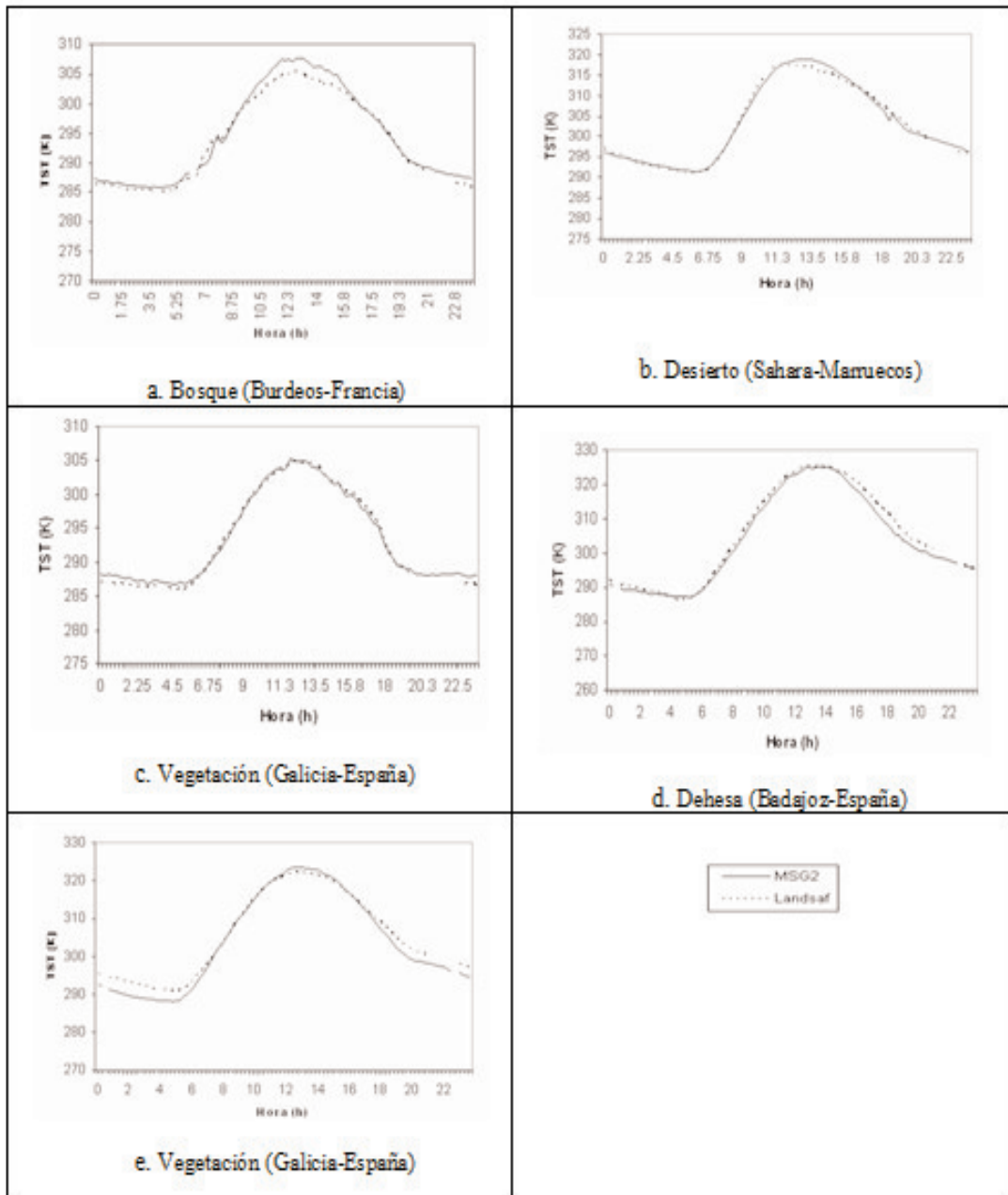


Figura 3. Valores de la TST calculada con el algoritmo propuesto para MSG2, y la TST del producto LANDSAF, durante el día 27 de julio de 2007: a) Bosque (Burdeos-Francia), b) Desierto (Sahara-Marruecos), c) Vegetación (Galicia-España), d) Dehesa (Badajoz-España) y e) Vegetación (Galicia-España)

CONCLUSIÓN

En este artículo, se presenta un algoritmo operativo para la estimación de la temperatura de superficie terrestre TST a partir de datos SEVIRI. Los resultados muestran un error en la TST de 1.3K, bajo ángulos de visión inferiores a 50 grados. Las TSTs obtenidas por el algoritmo propuesto se han comparado con datos in situ y productos MODIS y LANDSAF, los resultados de esta evaluación corroboran el error obtenido por las simulaciones.

APENDICE

Las imágenes SEVIRI se registran en tiempo real en el IPL en la Universidad de Valencia. Estas imágenes se reciben del MSG2 a partir de EUMETSAT en Darmstadt (Alemania), luego se procesan en el servidor Tellicast y se reenvían al satélite HOTBIRD con el formato comprimido HRIT (High Resolution Information Transmission), según (EUMETSAT, 2007 d). Desde allí las imágenes se pueden recibir en la banda Ku de Eumetcast con una antena receptora instalada en el IPL. El tratamiento de los datos recibidos en el IPL se realiza mediante el programa “Dartcom XRIT Ingester”, que adquiere automáticamente los datos HRIT, los descifra, los descomprime y los archiva para que sean listos para su visualización y tratamiento posterior. Las imágenes HRIT están en formato PGM (Portable Gray Map), que almacena las imágenes en escala de grises con una codificación de 10 bits. Este formato está diseñado de forma sencilla para poder ser utilizado por los programas de tratamiento de imágenes.

Para el uso cuantitativo de las imágenes MSG, éstas tienen que ser calibradas en reflectividades y temperaturas de brillo. La ecuación (6) presenta la ecuación de calibración:

$$R = (Slope * DN) + Offset \quad (6)$$

donde R es la radiancia en $mWm^{-2}sr^{-1}(cm^{-1})^{-1}$, DN es el número de cuentas digitales del MSG2 (DN: Digital Count); los valores de los coeficientes slope y offset, importantes para la calibración, son extraídos de la cabecera de la imagen bruta. Los valores típicos del slope y el offset, para los cuatro canales utilizados en este artículo, se muestran en la tabla 7:

| Canales | Slope | Offset |
|---------|---------|-----------|
| VIS06 | 0.02014 | -1.02691 |
| VIS08 | 0.02592 | -1.32202 |
| TIR10.8 | 0.20503 | -10.45676 |
| TIR12.0 | 0.22231 | -11.33788 |

Tabla 7. Valores de “slope” y “offset” para los cuatro canales del MSG2 utilizados en este trabajo

Para calcular la reflectividad a partir de las radiancias, se utiliza la siguiente fórmula (ecuación (7)):

$$\rho = \frac{\pi * R * d_{SA}^2}{I * \cos(\theta)} \quad (7)$$

donde ρ es el factor de reflectividad bidireccional (BRF: Bidirectional Reflectance Factor) y d_{SA} es la distancia astronómica entre el Sol y la Tierra (AU: Astronomic Unit) en el momento t, su valor está dada por la ecuación (8):

$$d_{SA} = 1 - 0.0167 \cos\left(\frac{2\pi (JulianDay - 3)}{365}\right) \quad (8)$$

Los otros términos de la ecuación (7) son: I es la banda de la irradiancia solar a 1AU en $mWm^{-2}(cm^{-1})^{-1}$, para el canal VIS06: $I = 65.2065 mWm^{-2}(cm^{-1})^{-1}$ y para el canal VIS08: $I = 73.1869 mWm^{-2}(cm^{-1})^{-1}$, de acuerdo con (EUMETSAT, 2007 a), y por último, θ es el ángulo cenital solar en radianes.

Los canales de radiancias térmicas pueden convertirse en temperaturas de brillo de la siguiente manera:

$$T_b = \frac{c_2 v_c}{\left(\log\left(\frac{c_1 v_c^2}{R} + 1\right) - B\right) * A} \quad (9)$$

donde T_b es la temperatura de brillo equivalente in K, v_c es el número de onda (en cm^{-1}), A y B son constantes que figuran en la tabla 8, y por último, C_1 y C_2 son las constantes de radiación, las cuales tienen valores de $1.1910659 \cdot 10^{-5} mWm^{-2}Sr^{-1}(cm^{-1})^{-4}$ y $1.438833 cm.K$, respectivamente.

| Canales | ν_c | A | B |
|---------|---------|--------|-------|
| TIR10.8 | 930.659 | 0.9983 | 0.627 |
| TIR12.0 | 839.661 | 0.9988 | 0.397 |

Tabla 8. Valores de A, B y los números de onda centrales para los dos canales térmicos IR10.8 e IR12.0

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo mientras Mariam Atitar disfrutaba de una beca concedida por la AECE - Agencia Española de Cooperación Internacional. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Espacial Europea ESA-ESTEC (CEFLES2, Project 20801/07/I-LG) por el apoyo económico y por habernos proporcionado los datos in situ, al Ministerio de educación y ciencias (ESP-2005-24355-E, UNLOV05-23-004 and ESP-2005-07724-C05-04) también por el apoyo económico, y a INRA (Institut National de la Recherche Agronomique - Burdeos - Francia), especialmente a Jean-Pierre Wigneron por darnos el permiso para instalar los radiómetros en la torre Le Bray, y a Jean-Marc Bonnefon por ocuparse de la descarga permanente de los datos in situ.

REFERENCIAS

ABREU, L. W. AND ANDERSON G.P (Eds.). (1996). The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL, MODTRAN report, Contract F19628-91-C-0132

BERK, A., BERNSTEIN, L. S., ANDERSON, G. P., ACHARYA, ROBERTSON, D. C., CHETWYND, J. H., AND ADLER-GOLDEN, S. M. (1998). MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 65, 367–375.

ERWIN L.A. WOLTERS, HARTWIG M. DENKE, ROB A. ROEBELING, AND ARNOUT J. FEIJT, “comparison of SEVIRI and MODIS cloud phase determination over mid-latitude regions”, Joint 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th Satellite Meteorology & Oceanography Conference of the American Meteorological Society, Amsterdam, The Netherlands, 24-28 September 2007, P.50,

S8_17, EUMETSAT website.

EUMETSAT website, January 2006, MSG SEVIRI Spectral Response Characterization, Doc N°: EUM/MSG/TEN/06/0010, Issue 1, 19.

EUMETSAT website, January 2007 (a), Radiometric Calibration of MSG SEVIRI Level 1.5 Image Data in Equivalent Spectral Blackbody Radiance, Doc N°: EUM/OPS-MSG/TEN/03/0064.

EUMETSAT website, February 2007 (b), Typical Radiometric Accuracy and Noise for MSG-1/2, Doc N°: EUM/OPS/TEN/07/0314

EUMETSAT website, August 2007 (c), MSG Level 1.5 Image Data Format Description, Doc N°: EUM/MSG/ICD/105.

LANDSAF Website, 18 September 2006, Product User Manual, PUM LST, LAND SURFACE TEMPERATURE, Ref. SAF/LAND/IM/PUM_LST/1.4, Version 1.4

SAUNDERS, R. W. AND KRIEBEL, K. T., 1988, “An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR Data”, *international Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, pp. 123-150.

SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M., BUGALIARO, L. ERBERTSEDER, T., GESELL, G. AND HOLZER-POPP, T. (2004a), Report on atmospheric parameter retrieval, Eney-Specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation (MSG): The Heliosat-3 Project (Contract NNK5-CT-2000-00322), 31 May 2004, DLR

SCOTT, N.A. AND CHEDIN, A. (1981). A fast line by line method for atmospheric absorption computations; the automatized Atmospheric Absorption Atlas. *Journal of Meteorology*, 20, 802-812

SNYDER, W.C., WAN, Z., ZHANG, Y. AND FENG, Y.-Z., 1998. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing* 19, pp. 2753–2774

SOBRINO, J.A, Z.-L.LI, STOLL, M.P. AND BECKER, F. (1996). Multi.Channel and Multi.angle algorithms for estimating sea and land surface temperatures with ATSR data, *International Journal of Remote sensing*, 17 (11), 2089-2114.

SOBRINO, J.A, RAISSOUNI, N AND LI, Z.-L. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75, 256-266.

- SOBRINO, J.A. AND ROMAGUERA, M. (2004). Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data. *Remote Sensing of Environment*, 92, 247-254
- SOBRINO, J. A., J. C. JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. EL-KHARRAZ, M. GÓMEZ, M. ROMAGUERA, AND G. SÒRIA, "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.*, vol. 25, no. 1, pp. 215–230, 2004.
- SOBRINO, J.A. AND ROMAGUERA, M. (2008). Water vapour retrieval from Meteosat 8/SEVIRI observations. *International journal of remote sensing*, 29:3, 741-754