

ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE CON EL METEOSAT 9: TEST Y COMPARACIÓN CON DATOS IN SITU Y PRODUCTOS LANDSAF

M. Atitar¹, J.A. Sobrino¹

Mariam.atitar@uv.es

¹ Departamento de Tierra, Física y Termodinámica, Universidad de Valencia, Burjassot, 46100, Valencia. España

RESUMEN

El objetivo principal de este artículo es dar un algoritmo operacional para la estimación de la temperatura de la superficie terrestre (TST) usando los canales del visible y del infrarrojo termico del sensor SEVIRI (Enhanced Visible and Infrared Imager) instalado a bordo del satélite MSG2 (Meteosat Second Generation/ nombrado antes como Meteosat 9). El algoritmo esta basado en el método **del Split Window** usando los dos canales del infrarrojo térmico (IR10.8 e IR12.0). El código de MODTRAN 4.0 fue utilizado para obtener los coeficientes numéricos del algoritmo propuesto. Los resultados demuestran que el algoritmo es capaz de estimar la TST con una desviación de estándar de 0.7K y con un error cuadrático medio (ECM) de 1.3K, **los dos valores son** para un ángulo de visión zenital inferior a 50°. El algoritmo se ha aplicado a una serie de imágenes MSG2 obtenidas por un sistema de recepción de datos MSG instalada en el **laboratorio de procesamiento de imágenes** (IPL: Imaging Processing Laboratory) en la universidad de Valencia. El producto TST se ha **validado** usando datos in situ de una campaña de medidas de la ESA (Agencia Espacial Europea) y con productos LANDSAF (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility). Los resultados muestran un ECM de 1.5K comparando con productos MODIS y de 0.9K comparando 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)

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 on board of MSG2 (Meteosat Second Generation/ 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 0.7K and a root mean square error (RMSE) of 1.3K, both of them, for viewing angle lower than 50°. The algorithm has been applied to a series of MSG2 images obtained from a MSG antenna system installed at the IPL (Image Processing Laboratory) in the University of Valencia. The LST product has been validated using in situ data from an ESA (European Space Agency) field campaign named CEFLES2 (CarboEurope, FLEx and Sentinel-2) carried out in 2007 in Bordeaux (France) and MODIS LST products over different surfaces and under different viewing angles. The results show a RMSE of 1.5K for MODIS LST products, and in comparison with LANDSAF products shows a RMSE of 0.9K.

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)

2 INTRODUCCIÓN

3 El satélite Meteosat de segunda generación (Meteosat Second Generation, MSG) fue desarrollado conjun-
4 tamente por la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA) y EUMETSAT. El satélite Me-
5 teosat 9 es el último de la serie MSG2, fue lanzado en diciembre de 2005. Es un satélite geoestacionario,
6 su **cuyo** principal sensor es el SEVIRI (the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imagen). Este sensor
7 detecta la radiación en 12 canales espectrales: tres en el visible, ocho en el infrarrojo próximo y un canal
8 en el visible de banda ancha y de alta resolución HRV (High Resolution Visible). Los tres canales del vi-
9 sible se centran en las longitudes de ondas de 0.6, 0.8 y 1.6 μm , y los ocho canales del infrarrojo próximo
10 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
11 μm . La gama dinámica máxima para los canales 10.8 y 12.0 es de 335K según (Eumetsat, 2006). Una de
12 las ventajas mas importantes del MSG2 es la resolución temporal (15 minutos), lo que permite una cober-
13 tura diaria de imágenes en comparación con los satélites orbitales. Todas estas características hacen del
14 SEVIRI una herramienta muy importante para la estimación de la TST.

15 En este artículo, proponemos un nuevo algoritmo de Split window para estimar la TST a partir de los da-
16 tos SEVIRI/MSG2. Este algoritmo utiliza los canales IR10.8 e IR12.0 del SEVIRI y tiene en cuenta la
17 dependencia angular del SEVIRI.

18 Los coeficientes del algoritmo split window se derivan a partir de las simulaciones con el MODTRAN 4.0
19 (The Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model), según (Abreu y Anderson,
20 1996) y (Berk y al. 1998)

21 EL ALGORITMO SPLIT WINDOW

22 La estructura del algoritmo se obtiene mediante la ecuación de transferencia radiativa, aplicada a la re-
23 gión del infrarrojo térmico, y que propone la radiación $B(T_{i\theta})$ medida a nivel del sensor para un canal
24 dado i y bajo el ángulo de observación zenital θ de acuerdo con la ecuación 1:

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

25 el primer término representa la emisión de la superficie atenuada por la atmósfera, donde, $\varepsilon_{i\theta}$ es la emisi-
26 vidad de la superficie, $B_i(T_s)$ es la radiancia emitida por un cuerpo blanco a una temperatura T_s de la su-
27 perficie, $\tau_{i\theta}$ es la transmisividad total atmosférica y $R_i(\text{ref})$ es la radiancia atmosférica reflejada dada por la
28 ecuación 2. En ella, donde, $R_{i\text{hem}}^{\downarrow}$ es la radiancia atmosférica descendente procedente de todo el hemisfe-
29 rio en el canal i , y que puede ser obtenida directamente de las simulaciones con MODTRAN4.0 junto con
30 la radiación atmosférica ascendente $R_{\text{at}\theta}^{\uparrow}$.

$$R_i(\text{ref}) = R_{i\text{hem}}^{\downarrow} (1 - \varepsilon_{i\theta}) \quad (2)$$

31 El método split-window consiste en combinar los datos obtenidos simultáneamente por los dos canales
32 del sensor en la misma ventana de transmisión atmosférica. Se tiene en cuenta entonces las diferentes
33 absorciones de la radiación por parte de la atmósfera en las dos longitudes de onda, y. Evaluando tales ab-
34 sorciones, es posible obtener la radiación absorbida por parte de la atmósfera. En este artículo, hemos

35 considerado el siguiente algoritmo (Ecuacion.3) para estimar la TST, dado por (Sobrino y al.1996), y
36 adaptado luego a las características del sensor SEVIRI:

$$\begin{array}{|l} T_s = T_i + a_1(T_i - T_j) + a_2(T_i - T_j)^2 + a_3(1 - \varepsilon) \\ + a_4W(1 - \varepsilon) + a_5\Delta\varepsilon + a_6W\Delta\varepsilon + a_0 \end{array} \quad (3)$$

37 Donde: T_s es la temperatura de la superficie TST (en K), T_i y T_j son las temperaturas radiométricas me-
38 didas a del por el sensor en de los dos canales del térmico del SEVIRI (en K), ε es la media de la emisi-
39 vidad efectiva: $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$, $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de emisividades: $\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$, W es el contenido total en vapor
40 de agua de la atmósfera (en g.cm^{-2}) en la dirección de observación del sensor, y los a_i son los coeficientes
41 numéricos del algoritmo, obtenidos con las simulaciones del MODTRAN.

42 METODOLOGÍA

43 A. Simulación de datos

44 Como hemos indicado antes, el MODTRAN 4.0 ha sido utilizado para extraer los coeficientes del algo-
45 ritmo y analizar los efectos atmosféricos. Para llevar acabo esta tarea, dos bases de datos de radiosondeos
46 han sido utilizados: la primera comprende 61 radiosondeos de observaciones extraídos de la base de datos
47 “TOVS initial guess retrieval (TIGR)” de acuerdo con (Scott y Chedin,1981), y la segunda los perfiles
48 atmosféricos estándar incluidos en MODTRAN 4.0 para latitudes medias en verano, latitudes medias en
49 invierno, tropical, subártico en verano y subártico en invierno.

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

52 Otro parámetro importante en estas simulaciones es la emisividad, y con la debido a la falta medidas an-
53 gulares de emisividad, hemos seleccionado 108 muestras naturales de los espectros de emisividad de la
54 biblioteca espectral de ASTER a nadir. Para cada canal térmico, los valores de emisividad se obtuvieron
55 mediante la integración de la función de filtro de respuesta, con la emisividad del espectro.

56 Como resultado, hemos obtenido 46116 situaciones diferentes (61 atmósferas, 7 ángulos y 108 espectros
57 de emisividad) que se utilizaron para cada canal térmico con el fin de obtener los coeficientes de regre-
58 sión lineal del algoritmo. Las emisividades se calcularon con para un rango de entre 0,7 a y 0,99, el vapor
59 de agua atmosférico fue extraído a partir de las los 61 de radiosondeos a en dirección nadir, proporcio-
60 nando una serie de (0-6) (g.cm^{-2}), y los valores de la temperatura del aire en la primera capa de la atmós-
61 fera van de 244-310 K.

62

63 B. Datos MSG2

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

68

69 RESULTADOS Y DISCUSIONES

70 A. Coeficientes del algoritmo

71 En esta sección presentamos el algoritmo TST final y el análisis de su sensibilidad. Con el fin de obtener
72 los valores numéricos de los coeficientes, los resultados de las simulaciones con MODTRAN y los espec-
73 tros de emisividad se han utilizado en la ecuación (3). Los resultados de la utilización del método de mí-
74 nimos cuadrados para calcular la desviación estándar y escoger la mejor combinación de los dos canales
75 térmicos del SEVIRI se muestran en la tabla.1. A partir de esta tabla, la mejor combinación de los dos ca-
76 nales térmicos del SEVIRI viene dada por los canales IR10.8 e IR12.0 ya que dan suponen el valor míni-
77 mo de la desviación estándar, 0.35K a en dirección nadir y 1.6K bajo un ángulo de visión de 60°.

78 *Insertar Tabla.1*

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

81 *Insertar Tabla. 2*

82 B. El algoritmo propuesto

83 Con el fin de obtener un algoritmo global de la TST, hemos ajustado los coeficientes de la tabla 2 en fun-
84 ción del coseno del ángulo de observación cenital θ . La comparación con diferentes formas del ajuste li-
85 neal da un mejor coeficiente de correlación (~ 1) usando $1/\cos^2(\theta)$ como variable en cada termino del al-
86 goritmo propuesto. La ecuación (4) da la estructura física del algoritmo propuesto para obtener la TST a
87 partir de datos SEVIR/MSG2:

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

88 Los valores necesarios para el cálculo de la TST, como el vapor de agua se obtiene siguiendo a (Sch-
89 roedter-Homscheidt et al, 2004a) y (Sobrinoy Romaguera, (2008)), el valor de la emisividad se ha calcu-
90 lado utilizando el método de umbrales desarrollado en (Sobrinoy et al , 2001) y adaptado en este caso al
91 SEVIRI. Otro algoritmo TST fue desarrollado en (Sobrinoy Romaguera, 2004) y adaptado al MSG1, tie-
92 ne 1,5 K de desviación estándar para ángulos inferiores a 50°. La comparación con este algoritmo y el
93 que se propone en este artículo se llevara a cabo en este artículo. En este artículo se pretende comparar
94 este último algoritmo con el que hemos propuesto. La proposición de un nuevo algoritmo para el MSG2
95 viene debida al cambio en las respuestas espectrales de los canales térmicos del SEVIRI para MSG1 y
96 MSG2, especialmente para el canal IR12.0, más detalles en (Eumetsat, 2006).

97 C. Análisis de sensibilidad:

98 Para obtener la precisión en la estimación de la TST, la tabla 3 muestra la estimación de errores de cada

99 termino del algoritmo y los errores totales obtenidos por a partir de la base de datos para cada ángulo de
100 observación θ ($\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{sd}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{\epsilon}^2 + \sigma_w^2}$), donde σ_{total} es el error total de la simulación de toda la base
101 de datos (en K), σ_{sd} es el error estándar de la estimación (en K), σ_{ruido} es el error debido a la incertidumbre
102 del ruido equivalente a la delta de temperatura (en K), σ_{ϵ} es el error debido a la incertidumbre en los valo-
103 res de la emisividad (en K), σ_w es el error debido a la incertidumbre en el valor del contenido total en va-
104 por de agua atmosférico (en K) y r es el coeficiente de correlación, una explicación detallada del la análi-
105 sis de sensibilidad puede encontrarse en (Sobrino et al, 2004). Los valores típicos de incertidumbres
106 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
107 agua atmosférico, y 0,07 y 0.1K para el ruido equivalente a la delta de temperatura (NE Δ T) para los cana-
108 les IR 10,8 y IR12.0 respectivamente, de acuerdo con (Eumetsat, 2007 b).

109 *Insertar Tabla. 3*

110 **COMPARASIONES Y EVALUACIONES**

111 *A. comparación con datos in situ*

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

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

118 La fecha seleccionada para comparar la TST es el 27 de julio de 2007, un día despejado sin nubes. La
119 TST se comparó con los datos in situ. La ecuación de transferencia radiativa (1) se ha utilizado para cal-
120 cular la temperatura de la superficie a partir de los dos radiómetros, donde la radiación atmosférica des-
121 cendente se calculó utilizando el código MODTRAN4.0 y el producto MODIS del perfil atmosférico
122 (MOD07_L2) para el día seleccionado. El valor de emisividad considerado para esta zona de bosque es de
123 0,98. La Figura 1 muestra los resultados del algoritmo propuesto en este artículo, en comparación con las
124 temperaturas obtenidas a partir de la temperatura de brillo de los dos radiómetros (R) y (EV), y también,
125 la TST calculada utilizando el algoritmo desarrollado para el MSG1 (Sobrino y Romaguera, 2004). Esta
126 comparación incluye 96 imágenes SEVIRI, adquiridas cada 15 minutos, durante el día seleccionado. Las
127 medidas efectivas de los radiómetros fueron promediadas cada 15 minutos con el fin de compararlos con
128 los valores de la TST del SEVIRI.

129 *Insertar Figura 1*

130 La tabla 4 muestra la comparación entre las temperaturas dadas por los datos in situ y las TSTs dadas por
131 el algoritmo propuesto y el algoritmo para el MSG1. En el caso del algoritmo propuesto, por la tarde y
132 por la noche, el error cuadrático medio ECM es inferior a 1.9K, pero durante el día el ECM alcanza los
133 7,6 K. Esto se debe al factor de escala entre la superficie cubierta por los radiómetros (16mx16m) y el ta-

134 maño del píxel SEVIRI (3kmx3km), lo que provoca que las medidas de los radiómetros son menos repre-
135 sentativas en las horas centrales del día, cuando existe una alta heterogeneidad térmica, lo que explica la
136 diferencia entre las medidas in situ y la TST del SEVIRI durante el día entre 8h30 y 18h15 UTC. El mis-
137 mo problema aparece usando el algoritmo para el MSG1 pero con un gran ECM. A continuación, se in-
138 cluye una segunda comparación utilizando productos oficiales de TST para MODIS y LANDSAF.

139 *Insertar Tabla 4*

140 *B. Comparasion con MODIS y LANDSAF*

141 Con el fin de comprobar la influencia en latitud y longitud y el tipo de la superficie, el algoritmo pro-
142 puesto en este artículo se comparó con el producto oficial de MODIS: MOD11_L2, y el producto oficial
143 de LANDSAF que usa imágenes del MSG2 (LANDSAF, 2006).

144 El día seleccionado para comparar la TST es el 27 de Julio de 2007. La comparación se llevó a cabo en
145 cuatro diferentes zonas homogéneas, a las 11:00 UTC, en zonas 3x3 píxeles de MODIS promediadas a 1
146 píxel SEVIRI, con un porcentaje de superposición de cobertura alrededor del 70% del píxel SEVIRI, y
147 dependiendo de la geometría de visión angular, este porcentaje debería, como mínimo, cubrir el 50% de la
148 zona estudiada según (Erwin et al, 2007). La Figura 2 muestra la imagen TST del SEVIRI con las cuatro
149 áreas escogidas para la comparación, y en la tabla 5 se muestra la diferencia de la TST calculada con los
150 dos algoritmos del MSG1 y MSG2, y los productos oficiales de MODIS y LANDSAF en las cuatro zonas
151 escogidas y bajo distintos ángulos de visión

152 *Insertar Figura 2*

153 *Insertar Tabla 5*

154 Desde la tabla 5, la diferencia entre la TST estimada con el algoritmo propuesto para el MSG2 y los pro-
155 ductos MODIS y LANDSAF da, en ambos casos, un ECM inferior al si usamos el algoritmo para MSG1.
156 La evaluación del algoritmo propuesto con el producto MODIS da un ECM de 1.5K; en el caso del pro-
157 ducto LANDSAF, esta diferencia es del orden de 0.9K.

158 Como el producto Landsaf utiliza imágenes del MSG2, tenemos un amplio rango de datos y cobertura
159 temporal para hacer una comparación más rigurosa con el algoritmo propuesto para el MSG2. De hecho,
160 la figura 3 ilustra 5 graficas, de diferentes zonas geográficas, comparando la TST calculada con el algo-
161 ritmo propuesto y el producto LANDASF a lo largo del día 27 de julio del 2007. Además, la tabla 6
162 muestra la diferencia entre las TSTs, y el error cuadrático medio.

163 *Insertar Figura 3*

164 *Insertar Tabla 6*

165 A partir de la tabla 6, la diferencia entre el algoritmo propuesto y le LANDASF genera un ECM que
166 varia entre 0.9K, en zonas homogéneas, como el desierto, y alcanza 2K en zonas urbanas, donde hay ma-
167 yor heterogeneidad térmica.

168 En las dos comparaciones con MODIS y LANDSAF, las diferencias de la TSTs se deben básicamente al

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

178 **CONCLUSIÓN**

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

184 **APENDICE**

185 Las imágenes SEVIRI se reciben en tiempo real en el IPL en la Universidad de Valencia. Estas imágenes
186 se reciben del MSG2 a partir de EUMETSAT en Darmstadt (Alemania), luego se procesan en el servidor
187 Tellicast y se reenvían al satélite HOTBIRD con el formato comprimido HRIT (High Resolution Informa-
188 tion Transmission), según (EUMETSAT, 2007 d). Desde allí las imágenes se pueden recibir en la banda
189 Ku de Eumetcast con una antena receptora instalada en el IPL. El tratamiento de los datos recibidos en el
190 LPI se realiza mediante el programa “Dartcom XRIT Ingestor”, que adquiere automáticamente los datos
191 HRIT, los descifra, los descomprime y los archiva para que sean listos para la visualización y el trata-
192 miento posterior. Las imágenes HRIT están en formato PGM (Portable Gray Map), que almacena las
193 imágenes en escala de grises con una codificación de 10 bits. Este formato está diseñado para ser extre-
194 madamente fácil de aprender y usar en los programas.

195 Para el uso cuantitativo de las imágenes MSG, estas tienen que ser calibradas en reflectividades y tempe-
196 raturas de brillo. La ecuación (6) da la formula para hacer la calibración:

$R = (Slope * DN) + Offset$	(6)
-----------------------------	-----

197 donde R es la radiancia en $mWm^{-2}sr^{-1}(cm^{-1})^{-1}$, DN es el numero de cuentas digitales del MSG2
198 (DN:Digital Count); el slope y el offset, importantes valores para la calibración, son extraídos de la cabe-
199 cera de la imagen bruta. Los valores típicos del Slope y el offset, para los cuatro canales utilizados en este
200 artículo, son dados en la tabla 7:

201 *Insertar tabla 7*

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

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

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

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

206 Los otros términos de la ecuación (7) son: I es la banda de la irradiancia solar a 1AU en $\text{mWm}^{-2}(\text{cm}^{-1})^{-1}$,
 207 para el canal VIS06: $I = 65.2065 \text{ mWm}^{-2}(\text{cm}^{-1})^{-1}$ y para el canal VIS08: $I = 73.1869 \text{ mWm}^{-2}(\text{cm}^{-1})^{-1}$, de
 208 acuerdo con (EUMETSAT, 2007 a), y por último, θ es el ángulo zenital solar en radianes.
 209 Los canales de radiancias térmicas pueden convertirse en temperaturas de brillo de la siguiente manera:

$T_b = \frac{c_2 v_c}{\left(\log\left(\frac{c_1 v_c^3}{R} + 1 \right) - B \right) * A}$	(9)
---	-----

210 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 cons-
 211 tantes que figuran en la tabla 8, y por último, C_1 y C_2 son las constantes de radiación, las cuales tienen va-
 212 lores de $1.1910659 \cdot 10^{-5} \text{ mWm}^{-2}\text{Sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-4}$ y $1,438833 \text{ cm.K}$, respectivamente.

213 *Insertar tabla 8*

214 **AGRADECIMIENTOS**

215 Este trabajo se llevó a cabo mientras Mariam Atitar disfrutaba de una beca concedida por la AECI 'Agen-
 216 cia Española de Cooperación Internacional. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia
 217 Espacial Europea ESA-ESTEC (CEFLES2, Project 20801/07/I-LG) por el apoyo económico y por haber-
 218 nos proporcionado los datos in situ, al Ministerio de educación y ciencias (ESP-2005-24355-E, UN-
 219 LOV05-23-004 and ESP-2005-07724-C05-04) por el apoyo economico tambien, y a la INRA (Institut
 220 National de la Recherche Agronomique - Burdeos - Francia)), especialmente a Jean-Pierre Wigneron por
 221 darnos el permiso de instalar los radiómetros en la torre Le Bray, y a Jean-Marc Bonnefon por ocuparse
 222 de la descarga permanente de los datos in situ.

223 **REFERENCIAS**

224 Abreu, L W. and Anderson G.P (Eds.). (1996). The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL,
 225 MODTRAN report, Contract F19628-91-C-0132

226 Berk, A., Bernstein, L. S., Anderson, G. P., Acharya, Robertson, D. C., Chetwynd, J. H., and Adler-
 227 Golden, S. M. (1998). MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVI-
 228 RIS. Remote Sensing of Environment, 65, 367–375.

229 Erwin L.A. Wolters, Hartwig M. Deneke, Rob A. Roebeling, and Arnout J. Feijt, “ comparison of
 230 SEVIRI and MODIS cloud phase determination over mid-latitude regions”, Joint 2007 EUMETSAT

231 Meteorological Satellite Conference and the 15th Satellite Meteorology & Oceanography Confer-
232 ence of the American Meteorological Society, Amsterdam, The Netherlands, 24-28 September 2007,
233 P.50, S8_17, EUMETSAT website.

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

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

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

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

242 LANDSAF Website, 18 September 2006, Product User Manual, PUM LST, LAND SURFACE TEM-
243 PERATURE, Ref. SAF/LAND/IM/ PUM_LST/1.4, Version 1.4

244 Saunders, R. W. and Kriebel, K. T., 1988, “An improved method for detecting clear sky and cloudy radi-
245 ances from AVHRR Data”, international Journal of Remote Sensing, Vol. 9, pp. 123-150.

246 Schroedter-Homscheidt, M., Bugaliaro, L. Erbertseder, T., Gesell, G. And Holzer-Popp, T. (2004a), Re-
247 port on atmospheric parameter retrieval, Energy-Specific Solar Radiation Data from Meteosat Second
248 Generation (MSG): The Heliosat-3 Project (Contract NNK5-CT-2000-00322), 31 May 2004, DLR

249 Scott, N.A. and Chedin, A. (1981). A fast line by line method for atmospheric absorption computations;
250 the automatized Atmospheric Absorption Atlas. Journal of Meteorology, 20, 802-812

251 Snyder, W.C., Wan, Z., Zhang, Y. and Feng, Y.-Z., 1998. Classification-based emissivity for land surface
252 temperature measurement from space. International Journal of Remote Sensing 19, pp. 2753–2774

253 Sobrino, J.A, Z.-L.Li, Stoll, M.p. and Becker, F. (1996). Multi.Channel and Multi.angle algorithms for es-
254 timating sea and land surface temperatures with ATSR data, International Journal of Remote sensing,
255 17 (11), 2089-2114.

256 Sobrino, J.A, Raissouni, N and Li, Z.-L. (2001). Acomparative study of land surface emissivity retrieval
257 from NOAA data. Remote Sensing of Environment, 75, 256-266.

258 Sobrino, J.A. and Romaguera, M. (2004). Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data.
259 Remote Sensing of Environment, 92, 247-254

260 J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, J. El-Kharraz, M. Gómez, M. Romaguera, and G. Sòria, “Single-
261 channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its ap-
262 plication to the Barrax site,” Int. J. Remote Sens., vol. 25, no. 1, pp. 215–230, 2004.

263 Sobrino, J.A. and Romaguera, M. (2008). Water vapour retrieval from Meteosat 8/SEVIRI observations.
264 International journal of remote sensing, 29:3, 741-754

265

266 **Tabla 1.** Desviación estándar (K) del algoritmo TST usando cuatro canales térmicos del SEVIRI en com-
 267 binaciones de dos y en función de 7 ángulos de observación zenital

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

268

269 **Tabla 2.** Coeficientes numericos del algoritmo TST

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	-	15.06	0.23
10	1.21	0.37	49.11	-4.13	-	14.85	0.24
20	1.20	0.38	48.56	-3.83	-	14.23	0.27
30	1.18	0.40	47.45	-3.29	-	13.25	0.33
40	1.16	0.44	44.69	-2.33	-	11.96	0.45
50	1.20	0.47	39.57	-1.02	-	10.87	0.66
60	0.85	0.60	18.72	3.30	-	1.57	2.00

270

271 **Tabla 3.** Estimación de los diferentes errores y el error total obtenido por la base de datos de simulacio-
 272 nes en función del ángulo de observación zenital:

θ (°)	σ_{sd}	r	σ_{rui} do	σ_e	σ_w	σ_{to-} tal
0	0.3	0.9	0.3	0.9	0.12	1.1
°	48	83	72	72		03
1	0.3	0.9	0.3	0.9	0.11	1.1
0°	54	82	74	71	8	05
2	0.3	0.9	0.3	0.9	0.11	1.1
0°	75	82	81	68	1	12
3	0.4	0.9	0.3	0.9	0.10	1.1
0°	16	8	94	65	1	27
4	0.5	0.9	0.4	0.9	0.08	1.1
0°	76	16	6	3		62
5	0.6	0.9	0.4	0.9	0.06	1.2
0°	9	65	46	65	4	69
6	1.6	0.8	0.4	0.7	0.03	1.8
0°	08	69	59	34	7	26

273

274 **Tabla 4.** Valores del ECM de la comparación entre la TST, calculada utilizando los algoritmos para
 275 MSG1 y MSG2, y la TST extraída y calculada a partir de los datos de los radiómetros RAYTEK1 (R) y
 276 Everest (EV) durante el día 27 de julio del 2007:

277

Hora (h)	MSG1		MSG2	
	$T_{SEVIRI}-T_{RI}$	$T_{SEVIRI}-T_{EV}$	$T_{SEVIRI}-T_{RI}$	$T_{SEVIRI}-T_{EV}$

	(K)	(K)	(K)	(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

278

279

280 **Tabla 5.** Valores de la diferencia, la desviación estándar (σ) y el ECM obtenidos a partir de la diferencia
281 entre los TST del los dos algoritmos para MSG1 y MSG2, y los productos MODIS y LANDSAF en cua-
282 tro áreas diferentes y bajo diferentes ángulos de visión:

Zona	Latitud	Longitud	Angulo de visión		Producto MODIS		Producto LANDSAF		
			SEVIRI (°)	MODIS (°)	$T_{\text{Modis}} - T_{\text{MSG1}}$ (K)	$T_{\text{Modis}} - T_{\text{MSG2}}$ (K)	$T_{\text{LANDSAF}} - T_{\text{MSG1}}$ (K)	$T_{\text{LANDSAF}} - T_{\text{MSG2}}$ (K)	
1. Le bray (Francia)	44° 43' 6.6''N	0° 45' 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

283

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

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°29'12.7" 5"N	3°43'55.96" O	-1.11	1.65	1.99

286

287 **Tabla 7.** Valores de los Slope y offset para cuatro canales del MSG2:

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

288

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

Canales	v_c	A	B
---------	-------	---	---

TIR10.8	930.659	0.9983	0.627
TIR12.0	839.661	0.9988	0.397

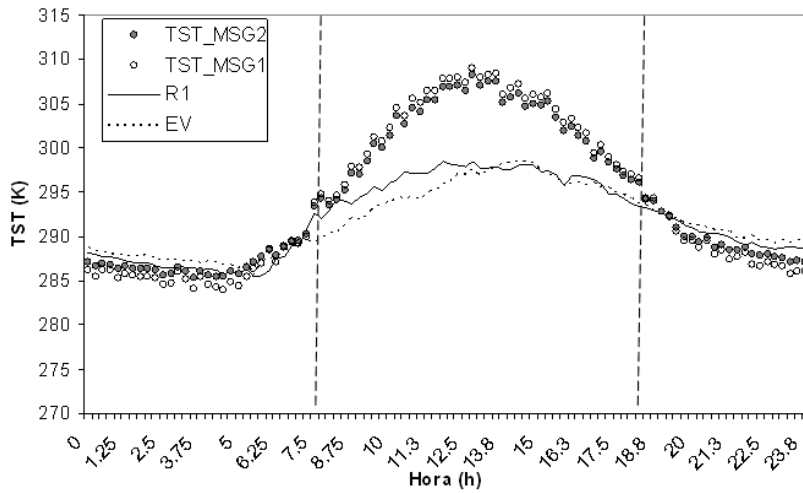
290

291

292

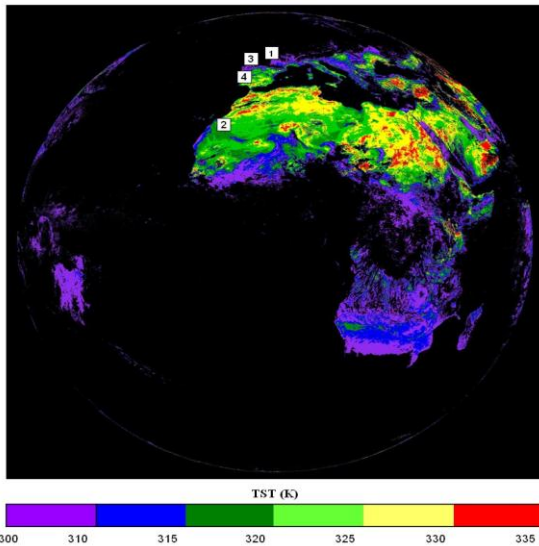
293

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



296

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

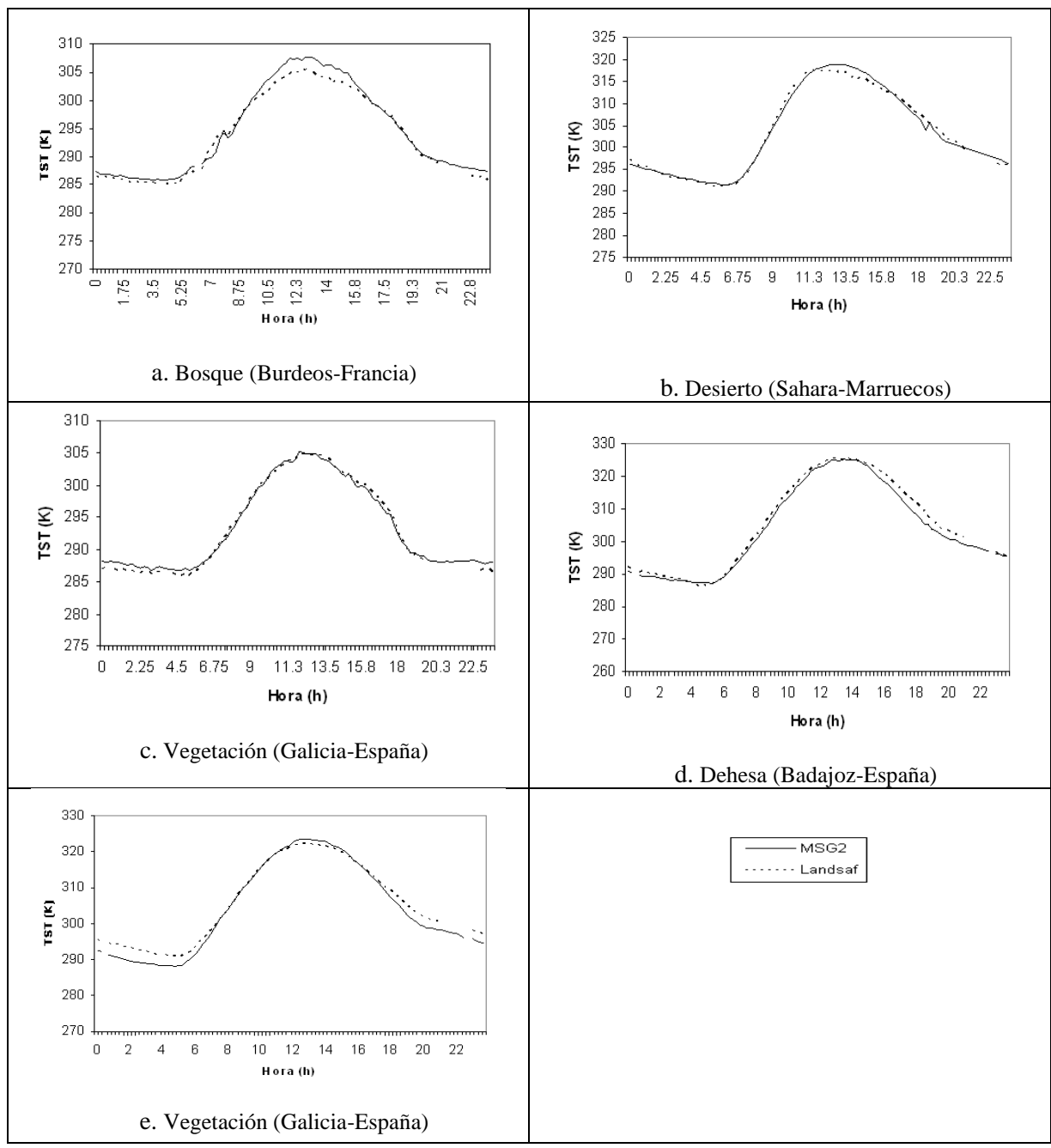


299

300

301

302 **Figura 3.** Valores de la TST calculada con el algoritmo propuesto para MSG2, y la TST del producto
 303 LANDASAF, durante el día 27 de julio del 2007: a) Bosque (Burdeos-Francia), b) Desierto (Sahara-
 304 Marruecos), c) Vegetación (Galicia-España), d) Dehesa (Badajoz-España) i e) Vegetación (Galicia-España)
 305



306
 307