

Dependencia angular del algoritmo de split-window para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre para el sensor modis

Galve, Joan M. ; Coll, César; Caselles, Vicente; Valor, Enric; Niclós, Raquel; Sánchez, Juan M.; Mira, María

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultat de Física, Universitat de Valencia
Dr. Moliner 50, 46100, Burjassot, Valencia, ESPAÑA

RESUMEN

Siguiendo el modelo de split-window de Coll y Caselles (1997), se ha generado un algoritmo que depende explícitamente del ángulo de observación, para la obtención de LST a partir de datos del sensor MODIS. Este algoritmo ha sido generado a partir de una base de radiosondeos terrestres y libres de nubes distribuidos uniformemente por todos los continentes. Se ha validado el algoritmo, mediante medidas coincidentes con el paso de satélite, en un cultivo del arroz durante los veranos del 2002 al 2006 y en un cultivo de soja durante el verano del 2002. Además también se ha validado el producto operativo de LST del sensor MODIS (Wan y Dozier, 1996).

Palabras Clave: MODIS, LST y Split-window.

ABSTRACT

Following the Coll and Caselles (1997) split-window model, an algorithm which explicitly depends on the observation angle, was generated for obtaining LST from the MODIS data. The algorithm was generated from a land and cloudless radiosounding database. The radiosoundings were equally distributed through all continents. The algorithm have been validated using ground measurements concurrent with satellite overpasses in a rice crop field at summers from 2002 to 2006 and in a soybean field at summer of 2002. Additionally the results obtained with the operational MODIS LST product (Wan y Dozier, 1996) were also validated.

Keywords: MODIS, LST and Split-window.

Introducción

La obtención de la temperatura de la superficie terrestre, LST (por sus siglas en inglés), a partir de la teledetección en el infrarrojo térmico es una de las principales herramientas para el estudio del balance de energía y masa entre la atmósfera y el suelo. Además esta magnitud es necesaria en la mayoría de modelos meteorológicos (Goutorbe et al., 1993) y de evapotranspiración (Seguin et al., 1993), y detección de incendios forestales (Calle et al., 2005), entre otras muchas aplicaciones.

Las medidas de temperaturas tomadas desde sensores (denominada temperatura de brillo) a bordo de satélites deben de ser corregidas de los efectos de la atmósfera (principalmente absorción y emisión debida al vapor de agua) y de los de la emisividad de la superficie terrestre. La dificultad reside en la gran variabi-

lidad espacio-temporal del vapor de agua atmosférico y de la dependencia de la emisividad en función del tipo de superficie, de la cobertura vegetal, la estructura o su evolución temporal, etc.

Los métodos de corrección atmosférica y emisividad más sencillos y operativos, a la vez que precisos, son los basados en la absorción diferencial (McMillin, 1975). La corrección atmosférica se obtiene a partir de la diferente absorción atmosférica que existe bajo dos condiciones de observación distintas. En nuestro caso, éstas son dos bandas espectrales situadas dentro de la ventana atmosférica entre 10,5 y 12,5 μm , donde la absorción atmosférica es distinta. Este tipo de métodos se denomina split-window (SW). Normalmente el método SW expresa la LST como una función lineal o cuadrática de la dife-

rencia entre las temperaturas de brillo, con coeficientes constantes válidos local o globalmente. Estos coeficientes se obtienen a partir de la simulación de medidas radiométricas con un conjunto de radiosondeos atmosféricos. El efecto de emisividad de la superficie se corrige a partir de los valores de la emisividad en las bandas consideradas. Este tipo de algoritmos no funcionan bien para ángulos de observación grandes, por lo que en este trabajo vamos a presentar un algoritmo con dependencia angular de forma que se obtengan mejores resultados para estos ángulos de observación sin degradar los resultados para ángulos pequeños.

En este trabajo se ha utilizado la base de radiosondeos, Cloudless Land Atmosphere Radiosounding (CLAR, Galve et al., 2007). A partir de ésta hemos generado dos algoritmos de tipo SW para la obtención de LST a partir de los datos obtenidos por el sensor MODIS, uno con coeficientes constantes y el otro con dependencia angular. Todos estos algoritmos se han validado en dos zonas de validación con medidas coincidentes en tierra sobre una extensión de cultivo de arroz y en una extensión de soja. Sus resultados se comparan con el producto operativo de LST de MODIS.

Desarrollo de algoritmos

Base CLAR

La base CLAR fue confeccionada a partir de radiosondeos compilados por el Atmospheric Science Department, University of Wyoming, disponibles a través de su página web: (weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

CLAR contiene un total de 382 radiosondeos medidos en estaciones meteorológicas terrestres distribuidas de forma uniforme por todo el globo. Todos los radiosondeos han sido sometidos a un filtro para eliminar todos aquellos susceptibles de tener nubes. Si un radiosondeo tiene una capa con una humedad relativa superior al 90% o más de una consecutiva con una humedad superior al 85% se considera como nublado y se elimina. Además si alguno posee en los dos primeros kilómetros una humedad superior al 80% se considera con niebla y también se excluye. CLAR posee una buena distribución en el contenido de vapor de agua la cual es uniforme hasta los 5,5 cm, alcanzando cerca de los 7 cm. Su distribución en latitud absoluta se basa en tres grupos. El 40% de los radiosondeos están en latitudes bajas (<30 °), otro 40% en latitudes medias (30° - 60°) mientras que el 20% restante está en latitudes altas (>60°).

Configuración de la simulación

Los algoritmos que hemos generado se basan en el modelo de SW de Coll y Caselles (1997), que puede escribirse como:

$$T = T_{11} + A (T_{11} - T_{12}) + \Delta + (1 - \varepsilon) \alpha - \Delta \varepsilon \beta \quad (1)$$

donde T es la LST, T_i es la temperatura de brillo en el canal j ($j = 11 \mu m$ o $12 \mu m$), A y Δ son los coeficientes atmosféricos que sólo dependen de las condiciones atmosféricas, y α y β son los coeficientes de la corrección de emisividad. La expresión teórica de todos estos coeficientes la podemos encontrar en Coll y Caselles (1997). Finalmente, ε y $\Delta \varepsilon$ son respectivamente la emisividad media y la diferencia espectral de la emisividad en los dos canales considerados. Los coeficientes A y Δ se pueden obtener a partir de la regresión lineal de $T - T_i$ frente a la diferencia de las temperaturas de brillo simuladas para el caso de cuerpo negro. De acuerdo con Coll y Caselles (1997), la regresión posee un carácter más cuadrático que lineal, lo que implica que el coeficiente A depende linealmente con $(T_{11} - T_{12})$ y el coeficiente Δ puede considerarse como una constante:

$$A = a_1 + a_2 (T_{11} - T_{12}) \quad (2)$$

$$\Delta = a_0 \quad (3)$$

donde los coeficientes a_i son los denominados atmosféricos. Éstos normalmente son independientes del ángulo de observación (θ). Esto puede acarrear unos errores excesivamente grandes para $\theta > 50^\circ$. Así pues, vamos a imponer a estos una dependencia con el ángulo de observación para reducir este error siguiendo la siguiente relación:

$$a_i = a_{i0} + a_{i1} (\sec(\theta) - 1) \quad (4)$$

con $i = 0, 1, 2$.

La radiancia medida en el canal i por un sensor que observa con un ángulo θ respecto al nadir, $L_i(\theta)$, un cuerpo negro a temperatura T puede escribirse como:

$$L_i(\theta) = \tau_i(\theta) B_i(T) + L_i^\uparrow(\theta) \quad (5)$$

donde B_i es la función de Planck, $\tau_i(\theta)$ y $L_i^\uparrow(\theta)$ son la transmisividad atmosférica y la radiancia emitida por la atmósfera hacia el sensor, respectivamente. Éstas han sido simuladas utilizando el modelo multicapa de transferencia radiativa MODTRAN 4 (Berk et al., 1999). La

temperatura de brillo en el canal i se obtiene a partir de la radiancia medida por el sensor, $L_i(q)$, de tal forma que $B_i(T_i)=L_i(q)$. Cada radiosondeo de la base CLAR se introduce en el MODTRAN 4, dividiéndose en 65 capas entre el nivel de superficie y los 100 km de altura. Para la T se tomó valores dependiendo de la temperatura de la primera capa del radiosondeo, T_0 . Tradicionalmente se han seleccionado unos valores estándar para todo el globo, por ejemplo Yu et al (2005) supuso que T_0-15 T_0+15 , mientras que Wan y Dozier (1989) consideraron T_0-20 T_0+20 . En nuestro caso se ha realizado un estudio estadístico de la diferencia de temperatura aire-suelo con los productos de 8 días de MODIS de LST y de perfiles atmosféricos para los años 2004 y 2005. Se ha seleccionado un conjunto de 5 diferencias de temperatura suelo-aire siguiendo una distribución estadística normal para cada tipo de atmósfera sea tropical (TROP), latitudes medias verano (MLS), latitudes medias invierno (MLW) o polares verano (PS) o invierno (PW). En la tabla 1 se muestran estas diferencias de temperatura.

Tabla 1. Diferencias de temperatura suelo-aire (en K) utilizadas para la simulación.

Percentil	TROP	MLS	MLW	PS	PW
16	3,0	5,1	2,4	3,2	-3,3
32	5,9	7,4	4,6	5,1	-1,6
50	9,0	10,2	6,9	6,7	0,3
68	11,7	13,8	9,8	8,3	2,6
84	14,5	17,6	13,6	10,1	5,0

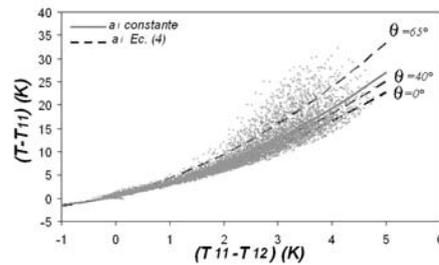


Fig. 1. T-T₁₁ frente T₁₁-T₁₂. Se muestra la función de corrección atmosférica con coeficientes constantes y con coeficientes para diferentes ángulos siguiendo (4).

Algoritmos de LST

Algoritmos generados

El sensor MODIS posee un campo de visión, que alcanza los 55°, que debido a la curvatura de la tierra se incrementa en el suelo hasta alcanzar los 65°. Por ello simulamos para los ángulos 0°, 11,6°, 26,1°, 40,3°, 53,7° y 65°. En la Figura 1 se observa la relación entre T-T₁₁ y T₁₁-T₁₂ a partir de la cual obtendremos los dos ajustes para los coeficientes atmosféricos bien con coeficientes constantes o con dependencia angular siguiendo la ecuación (4). También en la Figura 1 se muestra la función de corrección atmosférica con coeficientes constantes y también con los coeficientes obtenidos a partir de (4) para diferentes ángulos. A partir de estos coeficientes obtenemos los parámetros α y β de acuerdo con Coll y Caselles (1997) Como se observa en la Figura 2 éstos presentan una dependencia con el contenido de vapor de agua en el camino óptico recorrido, $W=W_0 \cos(\theta)$, donde W_0 es el contenido de vapor de agua en una columna vertical expresado en cm.

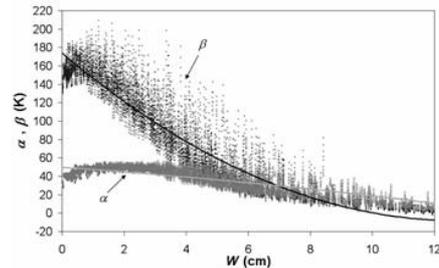


Fig 2. Ajuste coeficientes α (gris) y β (negro) en función de W(cm).

El algoritmo de SW queda de la siguiente forma:

$$T=T_{11}+a_0+a_1(T_{11}-T_{12})+a_2(T_{11}-T_{12})^2+(\alpha_0+\alpha_1 W+\alpha_2 W^2)(1-\epsilon)-(\beta_0+\beta_1 W+\beta_2 W^2)\Delta\epsilon \quad (6)$$

Los coeficientes atmosféricos serán constantes en el algoritmo T_c mientras que seguirán una dependencia con ángulo de observación según (4) en el algoritmo T_θ. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes para cada algoritmo.

El error debido al modelo utilizado, teniendo en cuenta la gran dispersión que muestra la simulación para $\theta > 40^\circ$, en el caso de T_c alcanza los ± 2 K mientras que en el caso de T_θ este error queda reducido hasta $\pm 1,5$ K. La

variabilidad de la emisividad en la superficie terrestre hace de ésta una importante fuente de error que encontramos en estos algoritmos. La obtención de la emisividad a partir de medidas de satélite muestra un error en emisividad alrededor de $\sim 0,01$ (Caselles et al., 1997). Por lo tanto el error teórico asociado a la emisividad en los dos casos es de $\pm 1,4$ K. La temperatura equivalente al ruido (NEDT) es $\sim 0,05$ K (Toller y Isaacman, 1996). Este hecho hace que el error asociado a las medidas implica un error en LST de $\pm 0,3$ K en ambos casos. Finalmente en el contenido de vapor de agua se obtiene un 10% de error (Seemann et al., 2006) por lo que esto implica un error en la LST en ambos casos de ± 0.12 K.

Producto operativo de LST del MODIS

El producto operativo de LST de MODIS (Wan y Dozier, 1996) se basa en un algoritmo del tipo SW con coeficientes determinados a partir de la regresión lineal de datos simulados para un gran grupo de superficies naturales y condiciones atmosféricas. Éstos dependen del ángulo de observación, del contenido de agua precipitable, y de la temperatura del aire a nivel de superficie.

Tabla 2. Coeficientes de los algoritmos SW generados.

		T_0	T_c
a_0 (K)	a_{00}	$0,34 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,04$
	a_{01}	$0,16 \pm 0,07$	
a_1	a_{10}	$2,31 \pm 0,05$	$2,37 \pm 0,05$
	a_{11}	$0,48 \pm 0,08$	
a_2 (K^{-1})	a_{20}	$0,433 \pm 0,014$	$0,594 \pm 0,014$
	a_{21}	$0,21 \pm 0,02$	
α_0 (K)		$49,81 \pm 0,15$	$50,27 \pm 0,14$
α_1 (Kcm^{-1})		$-2,33 \pm 0,05$	$-2,40 \pm 0,05$
α_2 (Kcm^{-2})		$-0,077 \pm 0,004$	$-0,077 \pm 0,003$
β_0 (K)		$173,8 \pm 0,4$	$172,2 \pm 0,4$
β_1 (Kcm^{-1})		$-28,45 \pm 0,45$	$-27,8 \pm 0,13$
β_2 (Kcm^{-2})		$1,111 \pm 0,010$	$1,067 \pm 0,009$

Validación

Con el propósito de validar los algoritmos se ha realizado una serie de campañas de medidas en una zona de arrozales situados cerca de Valencia (Coll et al., 2005-2006). Además, también hemos utilizado una zona de cultivo de soja en Mississippi (Wan et al., 2004).

Los valores de ε y $\Delta\varepsilon$ para el arrozal son $\varepsilon = 0,984$ y $\Delta\varepsilon = -0,003$ según el producto de temperatura y emisividad de la superficie terrestres MOD11 (Wan 1999). W_0 se ha obtenido a partir del producto de perfiles atmosféricos de MODIS (MOD07, Seemann et al., 2006) coincidentes espacio-temporalmente con el paso de los sensores. En la Tabla 3 mostramos los datos de validación que hemos utilizado en este trabajo. En las tres últimas columnas se presentan las diferencias entre la medida de temperatura «in situ» y la temperatura obtenida en cada uno de los

algoritmos bien sean con dependencia angular, T_{θ} , con coeficientes constantes, T_c , o el producto operativo de MODIS, MOD11.

Tabla 3. Validación de los algoritmos generados T_θ y T_c y comparación con el producto operativo de MODIS, MOD11, en las zonas de Valencia (Coll et al., 2005 y 2006) y Mississippi (Wan et al., 2004). En las últimas filas se indica el estadístico de cada uno de los algoritmos.

	<i>fecha</i>	θ	W_0	T	MOD11	T_{31}	T_{32}	T_θ	T_c	$T-T_\theta$	$T-T_c$	$T-MOD11$	
	dd/mm/aa	(°)	(cm)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
Valencia	07/10/02	43.7	2.4	28.8	27.4	23.9	23.0	27.9	27.8	0.9	1.0	1.4	
	07/26/02	43.7	2.9	28.0	26.4	21.7	20.3	27.6	27.6	0.4	0.4	1.6	
	07/08/03	60.3	2.2	28.6	27.5	22.2	20.8	28.7	27.9	-0.1	0.7	1.1	
	07/11/03	27.7	1.6	28.9	29.3	26.7	26.2	29.4	29.4	-0.5	-0.5	-0.4	
	08/09/03	60.5	2.2	30.1	28.6	23.3	21.9	29.7	28.9	0.4	1.2	1.5	
	08/12/03	28.1	1.5	31.2	31.0	28.2	27.7	31.1	31.1	0.1	0.1	0.2	
	07/08/04	50.3	1.9	25.3	25.4	22.5	21.9	25.4	25.3	-0.1	0.0	-0.1	
	07/27/04	5.6	1.7	27.9	28.2	25.5	24.9	28.4	28.5	-0.5	-0.6	-0.3	
	08/03/04	6.2	2.4	30.0	30.3	26.8	26.0	30.3	30.4	-0.3	-0.4	-0.3	
	08/12/04	5.7	2.1	28.7	28.7	25.8	25.2	28.7	28.9	0.0	-0.2	0.0	
	07/12/05	16.5	2.2	27.2	27.6	24.8	24.4	27.3	27.4	-0.1	-0.2	-0.4	
	07/14/05	5.9	2.4	27.9	27.8	24.9	24.3	28.0	28.1	-0.1	-0.2	0.1	
	07/21/05	5.4	2.0	28.4	28.6	25.7	25.0	28.8	28.9	-0.4	-0.5	-0.2	
	07/28/05	16.5	2.7	28.9	27.9	24.5	23.7	28.3	28.4	0.6	0.5	1.0	
	08/06/05	5.5	1.8	28.3	28.3	25.4	24.9	28.1	28.2	0.2	0.1	0.0	
	07/03/06	27.6	1.8	29.9	30.4	27.5	27.1	30.2	30.2	-0.3	-0.3	-0.5	
	07/17/06	6.0	2.9	29.9	29.4	25.0	23.7	30.1	30.5	-0.2	-0.6	0.5	
	07/22/06	26.9	2.4	29.4	29.5	26.1	25.4	29.4	29.5	0.0	-0.1	-0.1	
	07/24/06	5.5	2.4	29.2	29.2	25.8	24.9	29.3	29.5	-0.1	-0.3	0.1	
	07/28/06	36.0	2.0	28.5	27.6	24.2	23.5	27.9	27.9	0.6	0.6	0.9	
08/02/06	5.7	2.9	30.1	29.2	24.9	23.7	29.7	30.0	0.4	0.1	0.9		
Mississippi	07/17/02	7.0	3.5	23.7	23.9	22.05	21.65	24.3	24.4	-0.7	-0.8	-0.2	
	08/02/02	6.6	3.3	25.2	25.2	23.05	22.65	25.4	25.5	-0.2	-0.3	0.0	
	08/04/02	18.2	3.0	24.5	24.1	21.65	21.05	24.6	24.7	-0.1	-0.2	0.4	
	08/07/02	38.9	3.5	21.4	20.5	19.25	18.85	21.5	21.5	-0.2	-0.2	0.9	
	08/09/02	18.7	3.3	22.6	22.4	19.85	19.55	21.9	22.0	0.7	0.6	0.2	
										BIAS	0.0	0.0	0.3
										Desviación estándar (σ),	0.4	0.5	0.6
									RMSE= $\sqrt{BIAS^2 + \sigma^2}$	0.40	0.5	0.71	
									Máxima	0.9	1.2	1.6	
									mínima	-0.7	-0.8	-0.5	

Los algoritmos también se han validado con medidas «in situ» realizadas en una extensión de cultivos de soja (Wan et al., 2004). La emisividad de la soja se ha supuesto similar a la del arrozal. Los resultados obtenidos en esta zona también se incluyen en la Tabla 3.

Con estas dos zonas tenemos un total de 26 datos de validación de los cuales 5 tienen un ángulo de observación superior a los 40° y el resto por debajo. Se han separado los datos de validación para ángulos inferiores a 40° (Tabla 4) y superiores (Tabla 5). Los tres algoritmos para ángulos pequeños poseen unas diferencias con T que nunca superan el ± 1 °C. Tanto MOD11 como T_c poseen un pequeño bias al contrario que en T_θ . Sin embargo para ángulos grandes MOD11 y T_c poseen un gran bias y en el caso de MOD11 también aparece una gran dispersión que hace que su error alcance el $\pm 1,3$ °C.

Tabla 4. Resultados para los datos de validación con $\theta < 40^\circ$

n=21	$T-T_\theta$ (°C)	$T-T_c$ (°C)	$T-MOD11$ (°C)
BIAS	0,0	- 0,2	0,1
σ	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
RMSE	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
Max	0,7	0,6	1,0
min	-0,7	- 0,8	- 0,5

Tabla 5. Resultados para los datos de validación con $\theta > 40^\circ$

n=5	$T-T_\theta$ (°C)	$T-T_c$ (°C)	$T-MOD11$ (°C)
BIAS	0,3	0,7	1,1
σ	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$
RMSE	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,3$
Max	0,9	1,2	1,6
min	- 0,1	0,0	- 0,1

Conclusiones

Se ha compilado la base CLAR para generar algoritmos de LST. Con ésta y siguiendo el modelo de SW de Coll y Caselles (1997) se ha obtenido dos algoritmos para el sensor MODIS, uno con dependencia explícita con el ángulo de observación y el otro sin ella.

Con todos los puntos de validación el algoritmo T_c y el algoritmo T_θ tienen un error equivalente, $\pm 0,5$ K y $\pm 0,4$ K, mientras que el MOD11 tiene un error superior ($\pm 0,7$ K). Cabe destacar que el algoritmo T_θ es el único que no difiere de T_g en más de ± 1 K en ningún caso.

Se obtiene resultados equivalentes en todos los algoritmos para ángulos inferiores a 40° tal y como se muestra en la tabla 4. Los algoritmos generados proporcionan un RMSE = $\pm 0,4$ K, mientras que para MOD11 es de $\pm 0,5$ K.

Las mayores diferencias aparecen en los datos con un gran ángulo de observación ($> 40^\circ$) en donde el MOD11 muestra un empeoramiento de los resultados con un RMSE = $\pm 1,3$ K, del mismo modo el algoritmo T_c también posee un gran error ($\pm 0,8$ K). Sin embargo el algoritmo T_θ no presenta dicho comportamiento siendo su error el menor ($\pm 0,5$ K).

Aunque hay pocos puntos para determinar exhaustivamente la bondad del algoritmo generado, sí que se observa la necesidad de imponer una dependencia angular del algoritmo SW para ángulos superiores a 40°.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto CGL2004-06099-C03-01, cofinanciado con fondos FEDER de la Unión Europea; acciones complementarias CGL2005-24207-E y CGL2006-27067-E, y la beca de investigación de J.M. Galve y beca FPU de M. Mira) y por la Universidad de Valencia (Beca V Segles de J.M. Sánchez).

Referencias

- Berk, A., Anderson, G.P., Archarya, P.K. Chetwind, J.H., Berdnstein, L.S., Shettle, E.P., Mathew, M.W., y Adler-Golden, S.M., 1999, MODTRAN 4 user's manual. Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Material Command, Hascom AFB, MA 01731-3010, 95 pp
- Calle, A., Casanova, J.L., y Moclán C., 2005, Detection and monitoring of forest fires in China through the ENVISAT-AATSR sensor. *Proc. 5th Int. Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*: 149-152
- Caselles, V., Valor, E., Coll C., y Rubio, E., 1997, Thermal band selection for the PRISM instrument 1. Analysis of emissivity-temperature separation algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 102(D10): 11145-11164.
- Coll, C. y Caselles, V., 1997, A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison, *Journal of Geophysical Research*, 102: 16697-16713

- Coll, C., Caselles, V., Galve, J.M., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J.M. y Rivas R., 2005, Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 97: 288-300.
- Coll, C., Caselles, V., Galve, J.M., Valor, E., Niclòs, R., y Sánchez, J.M., 2006, Evaluation of split-window and dual-angle correction methods for land surface temperature retrieval from Envisat/AATSR data. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12105, doi 10.1029/2005JD006830.
- Galve J.M., Coll C., Caselles V., y Valor E., 2007, An atmospheric radiosounding database for generating land surface temperature algorithms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, en prensa
- Goutorbe, J-P., Level, T., Tinga, A. y 13 autores más, 1993, HAPEX-Sahel: A large scale study of land-atmosphere interactions in semi-arid tropics, *Annales Geophysicae*, 12: 53-64.
- Lambin, E.F., y Ehrlich, D., 1997, Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982-1991): application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 61: 181-200.
- McMillin, L.M., 1975, Estimation of the sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, *Journal of Geophysical Research*, 36: 5113-5117
- Seemann, S.W., Borbas E.E., Li J., Menzel, W.P. y Gumley L.E., 2006, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document, 40 pp, *Madison*, WI 53706.
- Seguin, B., Becker, F., Phulpin, T., Gu, X.F., Guyot, G., Kerr, Y., King, C., Lagouarde, J.P., Ottlé C., Stoll, M.P. y Tabbagh, A., 1999, IRSUTE: A minisatellite project for land surface heat flux estimation from field to regional scale. *Remote Sensing of Environment*, 68: 357-369.
- Toller, G.N. y Isaacman, A., 2003, MODIS Level 1B Product User's Guide, *NASA/Gooddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD 20771.
- Wan, Z. y Dozier, J., 1989, Land Surface Temperature Measurement from Space: Physical Principles and Inverse Modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27, 268-277.
- Wan, Z., y Dozzier, J. 1996, A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 34 (4): 892– 905.
- Wan, Z., 1999, MODIS Land surface temperature, Algorithm theoretical basis document. NAS5-31370 75 pp.
- Wan, Z, Zhang, Y., Zhang, Q, Li, Z.-L., 2004, Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 25 (1), 261– 274.
- Yu, Y., Privette J.L. y Pinheiro A.C., 2005, Analysis of the NPOESS-VIIRS Land Surface Temperature Algorithm Using MODIS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 2340-2350.