

Desarrollo y Validación de Algoritmos de Temperatura de la Superficie Terrestre

Development and Validation of Land Surface Temperature Algorithms

J. M. Galve, C. Coll, V. Caselles, E. Valor, J. M. Sánchez y M. Mira
joan.galve@uv.es

*Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia.
C/ Dr. Moliner 50 46100 Burjassot (Spain)*

Recibido el 16 de mayo de 2007, aceptado el 4 de abril de 2008

RESUMEN

Se ha generado una base de radiosondeos atmosféricos sin nubes y globales para simular medidas radiométricas de sensores en el infrarrojo térmico a bordo de satélites. El objetivo es generar algoritmos split-window (SW) para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre (LST) para los sensores a bordo de satélite Terra/MODIS y Envisat/ AATSR. Esta base contiene 382 radiosondeos tomados en estaciones meteorológicas terrestres con una distribución uniforme en el contenido de vapor de agua hasta los 5,5 cm. Los cálculos de transferencia radiativa se han realizado utilizando el modelo MODTRAN 4. Para las simulaciones se han utilizado diferentes ángulos de observación, considerando las características de cada sensor. Las bandas 31 y 32 del sensor MODIS, y las bandas 11 y 12 del sensor AATSR, son válidas para un algoritmo de tipo SW. Los algoritmos son cuadráticos y con una dependencia explícita con la emisividad de la superficie. Se ha realizado un análisis de sensibilidad para estimar así el error de los algoritmos. Éstos se han validado con medidas en tierra de LST tomadas coincidentemente con el paso de los sensores MODIS y AATSR, en una gran extensión de arrozales situada cerca de la ciudad de Valencia. Finalmente comparamos los resultados de nuestros algoritmos con los productos estándar de LST de ambos sensores en la misma zona. Se obtuvieron resultados similares en todos los algoritmos con un error de $\pm 0,5$ K.

ABSTRACT

A database of global, cloud-free, atmospheric radiosounding profiles was compiled with the aim of simulating radiometric measurements from satellite-borne sensors in the thermal infrared. The objective of the simulation is to generate split-window (SW) algorithms for the retrieval of land surface temperature (LST) from Terra/MODIS and Envisat/AATSR data. The database contains 382 radiosonde profiles acquired over land, with nearly-uniform distribution of precipitable water between 0 and 5.5 cm. Radiative transfer calculations were performed with the MOD-TRAN 4 code. Different viewing angles were considered in the simulation, taking into account the features of each sensor. The MODIS bands 31 and 32 and the AATSR bands 11 and 12 are suitable to use in a SW algorithm. These algorithms are quadratic in the brightness temperature difference, and depend explicitly on the land surface emissivity. A sensitivity analysis of the algorithms was made to obtain an estimation of the algorithms error. Furthermore the algorithms developed from the simulation database were validated with actual ground measurements of LST collected, concurrently to MODIS and AATSR observations, in a large area of rice crops located close to the city of Valencia, Spain. Operational LST algorithms of both sensors were also validated in order to compare with the algorithms generated. Similar results are obtained in all algorithms with an error around ± 0.5 K.

PALABRAS CLAVE: Split-window, MODIS, AATSR, simulación de transferencia radiativa, medidas “in situ”.

KEYWORDS: Split-window, MODIS, AATSR, radiative transfer simulation, ground measurements

INTRODUCCIÓN

La temperatura de la superficie terrestre, LST (por sus siglas en inglés), es una magnitud muy importante para el estudio del balance de energía y de masa entre la superficie terrestre y la atmósfera. Concretamente, la LST es necesaria como dato inicial en modelos de predicción meteorológica (Goutorbe *et al.*, 1993), cálculo desde satélite de la evapotranspiración (Seguin *et al.*, 1999), y detección de incendios forestales (Calle *et al.*, 2005), entre otros muchos. Además, puede considerarse también como indicador del cambio climático (Allen *et al.*, 1994) y de la desertificación de una zona (Lambin y Ehrlich, 1997). La teledetección en el infrarrojo térmico es la única posibilidad de obtener esta magnitud para grandes extensiones terrestres bajo diferentes resoluciones espaciales y periodicidades.

Para obtener la LST es necesario corregir la temperatura medida por el sensor, (denominada temperatura de brillo), de los efectos de absorción y emisión atmosféricos (principalmente del vapor de agua) y de los de la emisividad de la superficie terrestre. Las dificultades que esto plantea radican en la gran variabilidad espacio-temporal del vapor de agua atmosférico, y la dependencia de la emisividad en función del tipo de superficie, su cobertura vegetal, su estructura, 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 y de emisividad 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 diferente. Este tipo de métodos se denomina *split-window*, SW (Wan y Dozier 1996; Coll y Caselles, 1997). Normalmente el método SW expresa la LST como una función lineal o cuadrática de la diferencia 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.

En este trabajo se presenta una nueva base de radiosondeos, CLAR (Cloudless Land Atmosphere Radiosounding). A partir de ésta hemos generado algoritmos de tipo SW para la obtención de LST a partir de los datos obtenidos por los sensores MODIS y AATSR. Estos sensores poseen unos productos operativos de LST que también se basan en la técnica del SW. Todos estos algoritmos se han validado con medidas coincidentes en tierra sobre una extensión de cultivo de arroz.

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 (<http://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 en una columna vertical (W_0) 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 esta en latitudes altas (>60°). La figura 1 muestra la distribución global de las estaciones meteorológicas usadas para la adquisición de los radiosondeos y un histograma en función de W_0 .

Configuración de la simulación

Los algoritmos que hemos generado se basan en el

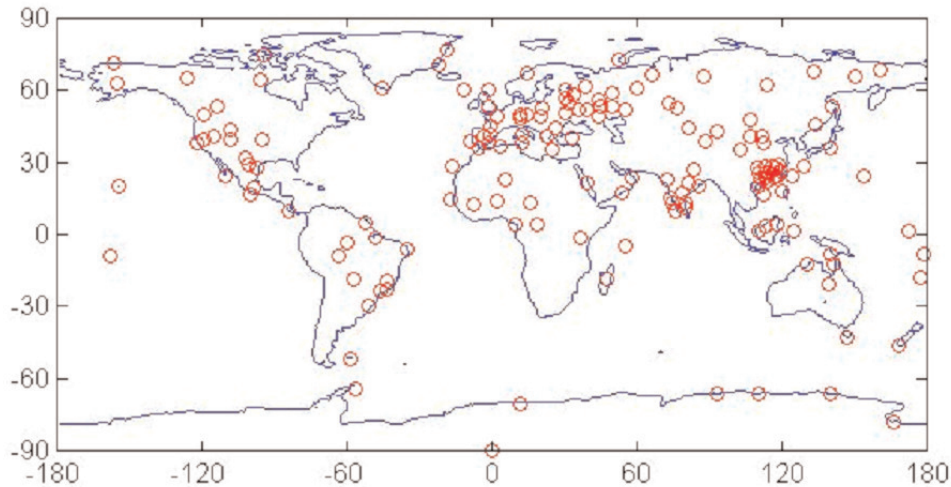
modelo de SW de Coll y Caselles (1997), que puede escribirse como:

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

donde T es la LST, T_i es la temperatura de brillo en el canal i ($i= 11\mu\text{m}$ o $12\mu\text{m}$), A y Δ son los coefi-

cientes 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.

a)



b)

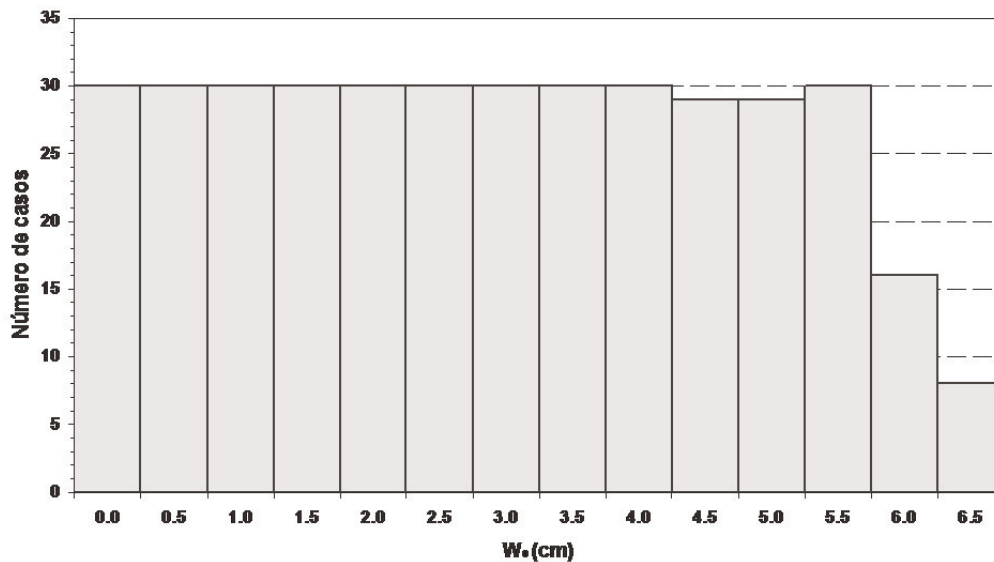


Figura 1. a) Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas para la obtención de los radiosondeos de la base CLAR. **b)** histograma de W_0 de la base CLAR.

Los coeficientes A y Δ se pueden obtener a partir de la regresión lineal de $T-T_i$ frente 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:

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

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

Posteriormente siguiendo a Coll y Caselles (1997) se puede obtener los coeficientes α y β . La radiancia medida en el canal i por un sensor que observa con un ángulo θ respecto el nadir, $L_i(\theta)$, un cuerpo negro a temperatura T puede escribirse como:

$$L_i(\theta) = \tau_i(\theta)B_i(T) + L_i^\uparrow(\theta) \quad (4)$$

donde B_i es la función de Planck, $\tau_i(\theta)$ y 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, $L_i(\theta)$, de tal forma que $B_i(T_i) = L_i(\theta)$. 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 . Se tomó un total de siete temperaturas distintas: $T_0 - 6$ K, $T_0 - 2$ K, $T_0 + 1$ K, $T_0 + 3$ K, $T_0 + 5$ K, $T_0 + 8$ K y $T_0 + 12$ K. Además las simulaciones se realizaron con ángulos de observación igual a los gaussianos (11,6°, 26,1° y 40,3°) y también se incluyó el nadir ($\theta = 0^\circ$).

ALGORITMOS DE LST PARA AATSR Y MODIS

Algoritmos generados

El sensor AATSR posee un pequeño campo de visión (<23°), con una resolución espacial de 1 km². Así pues, en el algoritmo SW para este sensor en visión nadir (ASWn) utilizamos las simulaciones con

tres ángulos de observación distintos (0°, 11,6° y 26,1°). El sensor MODIS posee un mayor campo de visión, que alcanza los 65°. Pero la mayor dificultad para estimar la emisividad de la superficie reside en el gran tamaño y en la heterogeneidad de los píxeles de tierra para ángulos de observación mayores de 45°. Además, el ajuste para ángulos superiores a los 45° sufre una degeneración debido a la excesiva dispersión que aparece. Por ello no consideramos ángulos mayores y sólo simulamos para los ángulos 0°, 11,6°, 26,1° y 40,3°. En la Figura 2 se observa el ajuste de los coeficientes a_k para el sensor MODIS (MSW). En la Tabla 1 se muestran los coeficientes atmosféricos, junto con sus errores, para ambos sensores. Además, también se incluye el error del ajuste, σ_{CA} , y su coeficiente de correlación.

A partir de estos coeficientes obtenemos los parámetros α y β de acuerdo con Coll y Caselles (1997). Como se observa en la Figura 3 éstos presentan una dependencia con el contenido de vapor de agua en el camino óptico recorrido, $W = W_0 / \cos(\theta)$. Por lo tanto el algoritmo queda expresado:

$$T = T_{11} + a_0 + a_1(T_{11} - T_{12}) + a_2(T_{11} - T_{12})^2 + (\alpha_0 + \alpha_1 W + \alpha_2 W^2)(1 - \epsilon) - (\beta_0 + \beta_1 W)\Delta\epsilon \quad (5)$$

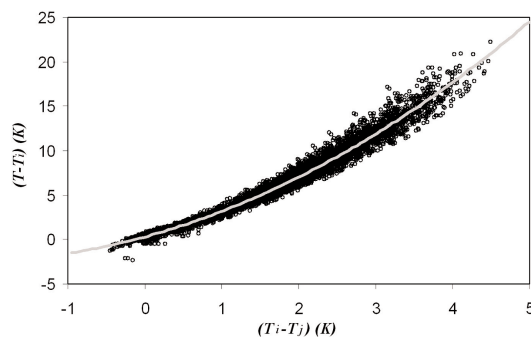


Figura 2. Ajuste de los coeficientes atmosféricos a_k para el caso del MSW.

	ASWn	MSW
a_0 (K)	0,024±0,018	0,319±0,011
a_1	0,782±0,016	2,370±0,017
a_2 (K ⁻¹)	0,320±0,03	0,494±0,005
σ_{CA} (K)	± 0,6	± 0,6
R^2	0,973	0,981

Tabla 1. Coeficientes atmosféricos de los algoritmos generados

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes obtenidos por la regresión lineal de los parámetros α y β , así como sus errores, su error de ajuste, σ_α y σ_β , y sus coeficientes de correlación.

Una forma de estimar cual es la precisión de estos algoritmos es calcular su error teórico. Éste depende del error cometido en los ajustes además del propagado a partir de los errores en las variables de entrada. Estos proceden de la temperatura de brillo, $\delta(T_b)$, de la emisividad, $\delta(\epsilon, \Delta\epsilon)$ y del contenido de vapor de agua, $\delta(W)$.

El error asociado a la temperatura de brillo puede considerarse como la diferencia de temperatura equivalente al ruido ($NE\Delta T$) que tanto para el MODIS como para el AATSR pueden considerarse como $0,05 K$. La variabilidad de la emisividad en la superficie terrestre hace de ésta la mayor 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). Mientras que en el caso del contenido de vapor de agua se obtiene un 10% de error (Seemann *et al.*, 2006). En la Tabla 3 se muestran los errores de cada una de las fuentes de error mientras que en la última columna aparece el error teórico total de cada algoritmo. Aunque los errores de α y β que aparecen en la Tabla 3 son considerables, hay que tener en cuenta que estos están ponderados por $(1-\epsilon)$ y $\Delta\epsilon$ respectivamente por lo tanto la contribución de estos al error del algoritmo es pequeña, alrededor de $\pm 0,12 K$.

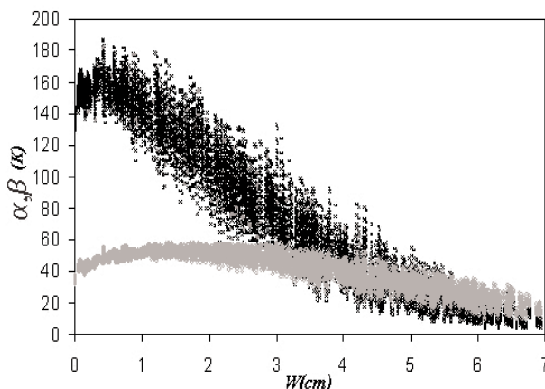


Figura 3. Ajuste de los coeficientes α (en gris) y β (en negro) para MSW.

	ASWn	MSW
$\alpha_0 (K)$	52,57±0,14	45,99±0,13
$\alpha_1 (K cm^{-1})$	1,13±0,11	4,67±0,10
$\alpha_2 (K cm^{-2})$	-1,023±0,017	-1,446±0,014
$\sigma_\alpha (K)$	± 5	± 5
R^2	0,979	0,974
$\beta_0 (K)$	79,2±0,2	160,5±0,3
$\beta_1 (K cm^{-1})$	-11,06±0,06	-25,75±0,08
$\sigma_\beta (K)$	± 9	± 15
R^2	0,837	0,916

Tabla 2. Coeficientes para la estimación de α y β

	$\delta(T_b)$	$\delta(W)$	$\delta(\epsilon, \Delta\epsilon)$	$\delta(Coef.)$	$\delta(T)$
ASW	± 0,2	± 0,06	± 0,8	± 0,6	± 1,1
MSW	± 0,3	± 0,08	± 1,4	± 0,6	± 1,5

Tabla 3 Errores teóricos (en K) de los algoritmos generados.

PRODUCTOS OPERATIVOS DE LST DE AATSR Y MODIS

El producto operativo de LST del sensor AATSR se implementa en el Rutherford Appleton Laboratory (RAL). Este algoritmo está basado en el algoritmo de SW de Prata (2000) implementado con coeficientes que dependen del tipo de suelo, i , del agua precipitable, W , y de la proporción de vegetación, f , y el ángulo de observación zenital, θ . RAL usa para definir los coeficientes mapas mensuales con una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitud y longitud de i , W y f . Los datos de este producto se pueden conseguir como AATSR_L2.

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 θ , W , y de la temperatura del aire a nivel de superficie. Las imágenes con este producto se obtienen a partir del producto MOD11.

VALIDACIÓN

Se ha recopilado una colección de medidas de temperatura en suelo coincidentes con el paso de los sa-

télites en la zona de validación de Valencia (Coll *et al.*, 2005 y 2006) durante los veranos de 2002 al 2006 para validar estos algoritmos. Los valores de ε y $\Delta\varepsilon$ del arrozal para el caso de MSW son $\varepsilon=0,984$ y $\Delta\varepsilon=-0,003$ según el producto de temperatura y emisividad de la superficie terrestre (MOD11, Wan 1999), mientras que para ASW se toma $\varepsilon=0,983$ y $\Delta\varepsilon=0,005$ a partir de medidas realizadas “*in situ*” siguiendo el método de la caja (Rubio *et al.*, 2003) con el radiómetro de 4 bandas CE312 (estas bandas son: una banda ancha 8-13 μm , 11,5-12,5 μm , 10,5-11,5 μm , y 8,2 – 9,3 μm ; Mas detalles Sicard *et al.*, 1999). El W se ha obtenido a partir del producto de perfiles atmosféricos del MODIS (MOD07, Seemann *et al.*, 2006) coincidentes en espacio y tiempo con el paso de los sensores. En la Tabla 4 mostramos la diferencia media entre la temperatura medida en el suelo y la calculada con cada uno de los algoritmos generados (δT). Se ha validado los resultados de los productos operativos para comparar con los obtenidos.

En Coll *et al.* (2006) se demostró que en el producto de LST para el AATSR la clasificación realizada por el RAL no es la adecuada debido a que los mapas utilizados no tienen una buena resolución. En este trabajo presentamos el algoritmo implementado específicamente para nuestra zona, es decir, suponemos que se puede clasificar como arbustos de hoja ancha. Además, como se trata de un cultivo de arroz en verano, se ha supuesto una cobertura vegetal total. Los valores del producto operativo de LST para el sensor MODIS se obtuvieron directamente desde el producto MOD11 (Wan y Dozier, 1996).

Nº de datos	Algoritmo	$\overline{\delta T}$ (K)	$\sigma(T)$ (K)	RMSE (K)
25	ASW	0,0	0,5	0,5
	AATSR LST	-0,1	0,5	0,5
18	MSW	0,0	0,4	0,4
	MOD11	0,1	0,6	0,6

Tabla 4 Errores de los algoritmos de LST obtenidos para la zona de Valencia ($\overline{\delta T}$ es el error medio; $\sigma(T)$ es la desviación estándar; $\text{RMSE}=\sqrt{\overline{\delta^2} + \sigma^2}$)

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 han obtenido algoritmos para los sensores AATSR y MODIS. Para es-

timar el error de ambos algoritmos, se ha realizado un cálculo teórico a partir de los errores de ajuste de los coeficientes y de la propagación de éstos en la variable de entrada, obteniendo unos errores teóricos de $\pm 1,1$ K y $\pm 1,5$ K para ASWn y MSW respectivamente. Pero para tener una mejor estimación del error de estos algoritmos se han validado en una zona cerca de Valencia. Se ha obtenido unos errores alrededor de $\pm 0,5$ K en ambos algoritmos. Los algoritmos generados mejoran los resultados obtenidos con los algoritmos de los productos LST de los sensores de hasta $\pm 0,2$ K. Los resultados obtenidos con los productos muestran un pequeño error sistemático que en los algoritmos generados no aparece. Estos resultados invitan a utilizar nuevas zonas de validación para comprobar estos resultados en zonas menos favorables y así poder determinar exactamente cual es error cometido con estos algoritmos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto CGL2004-06099-C03-01, cofinanciado con fondos FEDER de la Union 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

- ALLEN, M.R., MUTLOW, C.T., BLUMBERG, G.M.C., CHRISTY, J.R., MCNIDER, R.T., Y LLEWELLYN-JONES, D.T., 1994, Global change detection. *Nature*, 370: 24-25.
- 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.
- 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
- PRATA, A. J., 2000, Land surface temperature measurement from space: AATSR algorithm theoretical basis document. *Technical report*. CSIRO 27 pp.
- RUBIO, E., CASELLES, V., COLL, C., VALOR, E., Y SOSPEDRA, F., 2003. Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (24), 5379– 5390.
- 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., LA-GOUARDE, 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.
- SICARD, M., SPYAK, P. R., BROGNIEZ, G., LEGRAND, M., ABUHASSAN, N. K., PIETRAS, C., Y BUIS, J. P. (1999). Thermal infrared field radiometer for vicarious cross-calibration: Characterization and comparisons with other field instruments. *Optical Engineering*, 38(2), 345– 356.
- 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.