

Selección de las bandas térmicas del instrumento PRISM

E. Valor, V. Caselles, C. Coll, E. Rubio y F. Sospedra

Departament de Termodinamica. Facultat de Física. Universitat de Valencia. 46100 Burjassot, Valencia

e-mail: enric.valor@uv.es

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los principales resultados obtenidos en la selección de bandas térmicas del instrumento PRISM (*Processes Research by Imaging Space Mission*), actualmente en fase de estudio por la Agencia Espacial Europea dentro de su Programa de Observación de la Tierra. El radiómetro infrarrojo se ha diseñado para obtener la temperatura de la superficie terrestre con la mayor precisión posible, pues es un parámetro de entrada de muchos modelos. Para ello hemos definido la configuración de bandas más adecuada (*cuántas y en qué intervalos espectrales deben situarse*), así como los algoritmos más apropiados para realizar la corrección atmosférica y de emisividad.

PALABRAS CLAVE: Temperatura, emisividad, corrección atmosférica, bandas óptimas.

ABSTRACT

In this work the main results obtained in the thermal band selection of the PRISM instrument (*Processes Research by Imaging Space Mission*) are presented. This sensor is presently under study in the framework of the European Space Agency Earth Observation Programme. The thermal radiometer has been designed to assess accurate Land Surface Temperature, since it is a key parameter in different models. To this end, the most adequate band configuration has been determined, and the most suitable atmospheric and emissivity correction algorithms have been defined.

KEY WORDS: Temperature, emissivity, atmospheric correction, optimal band configuration.

INTRODUCCION

Actualmente la Agencia Espacial Europea (ESA) está diseñando varias misiones en su programa *Earth Observation Programme*. Una de estas misiones tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de las interacciones entre la superficie y la atmósfera a escala local, con objeto de mejorar el conocimiento de estos procesos e interacciones a escala regional y mundial. Esta misión se conoce con el nombre de PRISM (*Processes Research by Imaging Space Mission*) (Readings y Reynolds, 1996).

El PRISM es un instrumento de alta resolución que comprende un espectrómetro que cubre las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio (V/IC/IM), y un radiómetro infrarrojo térmico que puede trabajar en las cuatro bandas siguientes: 3,5-4,1 μm (A), 8,1-9,5 μm (B), 10,3-11,3 μm (C), y 11,3-12,3 μm (D). El principal objetivo del instrumento térmico es determinar la temperatura de la superficie terrestre con la máxima precisión, puesto que ésta es un dato de entrada básico, de interés en muchos procesos que tienen lugar en la superficie terrestre. La obtención de la temperatura se ve en gran parte dificultada por la perturbación de la atmósfera y también por la indeterminación de la radiancia térmica, donde la temperatura y la emisividad de la superficie están acopladas. Para determinar la temperatura de la superficie terrestre a partir de datos térmicos, es necesario optimizar el número de bandas del sensor, sus posiciones y anchuras espectrales, así como definir los algoritmos más adecuados para realizar las correcciones atmosféricas y de emisividad. Para resolver la cuestión, planteamos el estudio en las siguientes fases: (i) revisión y selección de las técnicas de obtención de la tempera-

tura de la superficie terrestre más adecuadas; (ii) simulación de las configuraciones óptimas; y (iii) conclusiones del estudio.

ALGORITMOS DE SEPARACION DE EMISIVIDAD Y TEMPERATURA

Primeramente, hemos hecho una revisión de las diferentes metodologías que nos van a permitir determinar la emisividad de la superficie terrestre y cartografiarla. En concreto, analizamos el método de los coeficientes TISI (Li y Becker, 1993), el método de los coeficientes alfa (Kealy y Hook, 1993), y los algoritmos que incorporan datos del dominio óptico junto con medidas de campo a través de un modelo físico (Método de la Cobertura Vegetal, MCV, Valor y Caselles, 1996). De cada uno de los modelos hicimos un análisis de sensibilidad e identificamos sus condiciones de aplicación respectivas (Caselles et al., 1997a). A partir de este estudio concluimos que el método más apropiado es el MCV, básicamente por tres razones: (1) no necesita información auxiliar para ser aplicado, (2) no posee ninguna fuente de error sistemático significativa, y (3) proporciona la emisividad con el menor error de estimación (Figura 1). También de este estudio se desprende que la mejor región espectral para aplicar estos métodos es el intervalo 10-12,5 μm .

ALGORITMOS DE CORRECCION ATMOSFERICA Y DE EMISIVIDAD

Hemos analizado los diferentes métodos de corrección atmosférica y de emisividad, a saber: los algoritmos monocanales (se basan en la inversión

de la ecuación de transferencia radiativa a partir de la medida realizada en una sola banda, debiéndose calcular los parámetros atmosféricos adecuados), algoritmos de *split-window* (la corrección atmosférica se obtiene a partir de su correlación con la absorción diferencial en dos canales contiguos) y algoritmos biangulares (la corrección se realiza a partir de medidas efectuadas en un solo canal espectral, pero bajo dos ángulos de observación diferentes). La comparación y selección se establece en función de un análisis de sensibilidad, así como de las condiciones de aplicabilidad y limitaciones de cada método (Caselles et al., 1997b).

Métodos de tipo monocanal

La Figura 2 muestra el análisis de la contribución al error total de las diferentes fuentes de error consideradas en los algoritmos de tipo monocanal, para cada una de las bandas estudiadas. Las principales conclusiones que se obtienen son: (1) la sensibilidad de la corrección atmosférica a las incertidumbres en los perfiles de temperatura y humedad aumenta con la longitud de onda siendo mínima para el canal A y máxima para el canal D donde el continuo de absorción del vapor de agua es dominante; (2) la corrección por emisividad presenta el comportamiento opuesto a la corrección atmosférica: el canal A presenta el mayor error mientras que el canal D presenta el error más bajo, ya que la variabilidad en la emisividad disminuye; (3) la combinación de errores atmosféricos y de emisividad dan resultados similares para los canales del PRISM (alrededor de ± 1 K), excepto para el canal A ($\pm 0,5$ K), el cual sólo es útil por la noche; y (4) es necesario tener un conocimiento preciso de los perfiles atmosféricos para efectuar la corrección atmosférica.

Métodos de tipo *split-window*

Los principales resultados en relación con estos algoritmos pueden observarse en las Figuras 3a y 3b, los cuales pueden sintetizarse del siguiente modo: (1) algoritmos de tres y cuatro canales no suponen mejoras significativas frente a los algoritmos bicanales; (2) combinaciones del canal B con los canales C o D no mejoran los resultados de la combinación clásica C-D; de hecho, el funcionamiento de estos otros algoritmos es significativamente peor; (3) el uso de un algoritmo de *split-window* incluyendo el canal A sólo es aplicable por la noche; y (4) la combinación de bandas C-D es el mejor algoritmo de *split-window*.

Métodos biangulares

El análisis de los algoritmos biangulares, que se presenta en las Figuras 4a y 4b, muestra que: (1) la configuración óptima de canales es $\theta=0^\circ$ y $\theta=45^\circ$ en combinación con las bandas A y C; (2) la hipó-

tesis de igualdad de emisividades a $\theta=0^\circ$ y $\theta=45^\circ$ no debe mantenerse y puede producir errores sistemáticos en la recuperación de la temperatura de la superficie terrestre en superficies homogéneas; y (3) estos algoritmos no pueden aplicarse para superficies heterogéneas, porque las temperaturas medidas en los dos ángulos de observación corresponden a sistemas radiativos diferentes, careciendo su combinación de sentido físico.

Comparación

Comparamos los tres tipos de modelos de corrección atmosférica y de emisividad con objeto de conocer las condiciones de aplicabilidad de cada método (Caselles et al., 1997b). De esta comparación podemos concluir que el mejor modelo para determinar la temperatura de la superficie terrestre es el algoritmo *split-window*, básicamente por tres razones: (1) no precisa información adicional (radiosondeos, variación angular de la emisividad) para ser usado; (2) no presenta ninguna limitación para su aplicación; y (3) presenta un error de estimación de la temperatura similar al de los algoritmos monocanales y biangulares (alrededor de ± 1 K). Además la región espectral más apropiada para aplicar estos modelos es de 10-12,5 μm .

SIMULACION

Una vez seleccionados los mejores algoritmos para la determinación de la emisividad y la temperatura de la superficie terrestre, llevamos a cabo un estudio sobre la configuración espectral de canales más apropiada para determinar con precisión la temperatura. Aunque del estudio previo ya se deduce que la mejor región espectral es el intervalo 10-12,5 μm , el número de posibles combinaciones es elevado si tenemos en cuenta que podemos modificar tanto la anchura de las bandas como su posición espectral. Por ello era preciso afinar en la solución final mediante un estudio de simulación.

Este estudio comprende dos partes: (i) en una primera etapa, a partir de razonamientos teóricos obtuvimos un conjunto de bandas potenciales 1 y 2. Este conjunto consta de 10 posibles canales 1 y 11 posibles canales 2 (Caselles et al., 1998); y (ii) en una segunda etapa realizamos la simulación alrededor de estas bandas preliminares con objeto de establecer la configuración de canales óptima. De este modo nos evitamos un gran número de cálculos.

El primer paso en el proceso de simulación alrededor del conjunto de canales potenciales 1 y 2 fue la construcción de una base de datos con carácter general compuesta por temperaturas de la superficie verdaderas, y temperaturas de canal en el techo de la atmósfera. Esta base de datos incluye un total de 6.120 sistemas resultado de combinar las siguientes variables: 51 perfiles atmosféricos reales procedentes de muy diversas regiones (Bolivia, Níger, España), un único ángulo de observación, 6 temperaturas de la superficie y 20 tipos diferentes

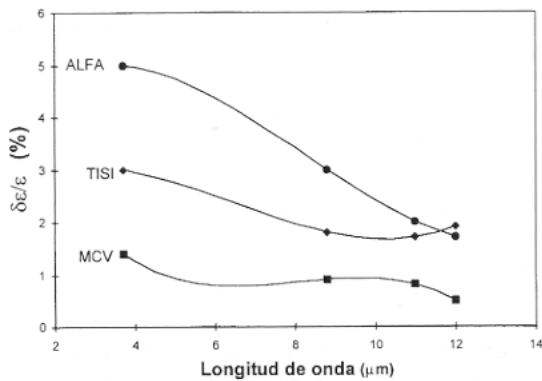


Figura 1. Errores relativos de estimación de la emisividad de la superficie terrestre, $\delta\epsilon/\epsilon$, para los tres algoritmos analizados (coeficientes alta, TISI, Método de la Cobertura Vegetal) en función de la longitud de onda.

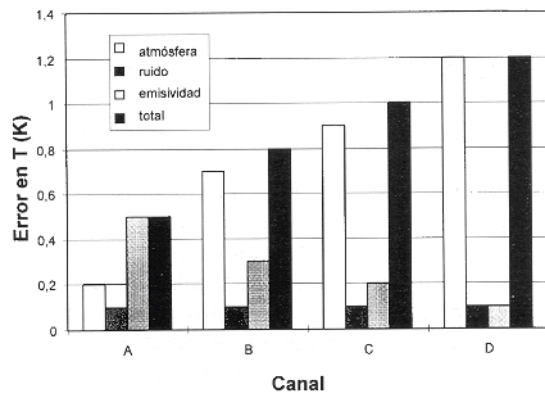


Figura 2. Análisis de contribuciones al error total en la temperatura para el método monocanal, correspondientes a los distintos canales y a las diferentes fuentes de error consideradas: corrección atmosférica (*atmósfera*), corrección de emisividad (*emisividad*), propagación del ruido radiométrico (*ruido*).

de superficies con emisividades distintas (Salisbury y D' Aria, 1992). El algoritmo que se usó es un modelo *split-window* cuadrático, cuya expresión general es de la forma:

$$T = T_1 + A(T_1 - T_2) + B(T_1 - T_2)^2 + C(1 - \epsilon) + D\Delta\epsilon + E$$

donde T es la temperatura de la superficie corregida de los efectos atmosférico y de emisividad, T_1 y T_2 son las temperaturas medidas por el instrumento en los canales 1 y 2, $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)^2$ y $\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$, siendo ϵ_1 y ϵ_2 las emisividades de la superficie en los canales 1 y 2, y A, B, C, D y E los coeficientes empíricos, que se obtienen por regresión sobre la base de datos considerada.

De este análisis se concluyó que: (1) se obtienen mejores resultados cuanto más estrechas son las bandas, y (2) los resultados mejoran cuanto más separadas están. Utilizando este procedimiento se obtuvieron 23 posibles configuraciones óptimas, con las que se puede obtener la temperatura de la superficie con un error de $\pm 0,9$ K (ver Tabla 1).

Posteriormente se consideró el impacto de la variación espectral del ruido. Los nuevos resultados de la simulación revelaron que: (1) por debajo de un ruido de $\pm 0,3$ K, la influencia de la variación espectral es irrelevante tanto en el número de configuraciones óptimas como en el error de estimación de la temperatura; (2) por encima de ese valor umbral, se produce una drástica reducción de 23 a sólo 5 posibles combinaciones óptimas, siendo en este caso el error de estimación de alrededor de $\pm 1,2$ K.

CONCLUSIONES

Como resultado de este análisis se deduce que las condiciones que debe reunir el instrumento son las siguientes: (1) basta con un solo ángulo de observación (nadir); (2) deben usarse dos canales situados en la región 10-12,5 μm , encontrándose lo más separados posibles, y (3) junto con esta configuración de canales los métodos más apropiados para obtener la temperatura de la superficie terres-

tre son el MCV para cartografiar la emisividad de la superficie terrestre y un método *split-window* cuadrático para la corrección atmosférica y de emisividad.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se llevó a cabo bajo contrato con la Agencia Espacial Europea (Contrato n° 11402/95/NL/CN), a la que deseamos expresar nuestra gratitud, especialmente al Dr. U. Del Bello y al Dr. P. Kealy. Asimismo, agradecemos al Prof. J. W. Salisbury (Universidad Johns Hopkins, USA) los espectros de emisividad medidos en laboratorio. También agradecemos al Ministerio de Educación y Ciencia las becas recibidas por Enric Valor y Eva Rubio, así como a la CICYT la financiación proporcionada (proyecto AMB94-1208).

BIBLIOGRAFIA

- CASELLES, V., VALOR, E., COLL, C. y RUBIO, E. 1997a. Thermal band selection for fue PRISM instrument 1. Analysis of Emissivity-Temperature Separation Algorithms. *Journal of Geophysical Research*. 102(D10): 11145-11164.
- CASELLES, V., COLL, C., VALOR, E. y RUBIO, E. 1997b. Thermal band selection for fue PRISM instrument 2. Analysis and comparison of the existing atmospheric and emissivity correction methods for land surface temperature recovery. *Journal of Geophysical Research*. 102(D16): 19611-19627.
- CASELLES, V., RUBIO, E., COLL, C. y VALOR, E. 1998. Thermal band selection for fue PRISM instrument 3. Optimal band configurations. *Journal of Geophysical Research*. 103(D14): 17057-17067.
- KEALY, P. S. y HOOK, S. J. 1993. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 31 (6): 1155-1164.
- LI, Z.-L. y BECKER, F. 1993. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 43: 6785.

READINGS, C. J. y REYNOLDS, M. L. 1996. *The Nine Candidate Earth Explorer Missions*. ESTEC, Noordwijk. ESA Publications Division. ESA-SP 1996.

SALISBURY, J. W. y D'ARIA, D. M. 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*. 42: 83-106.

VALOR, E. Y CASELLES, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African and South-American areas. *Remote Sensing of Environment*. 57: 167-184.

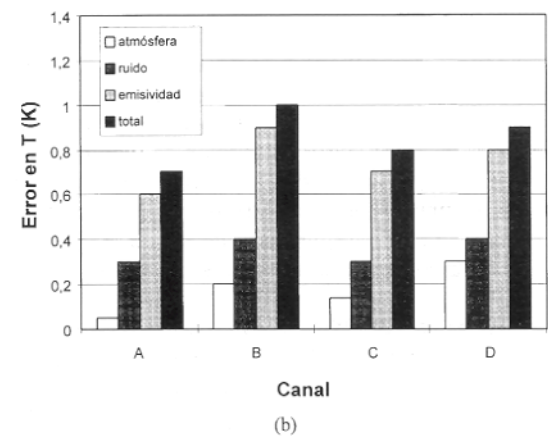
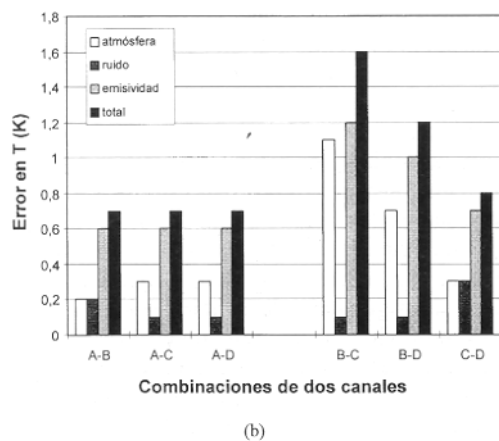
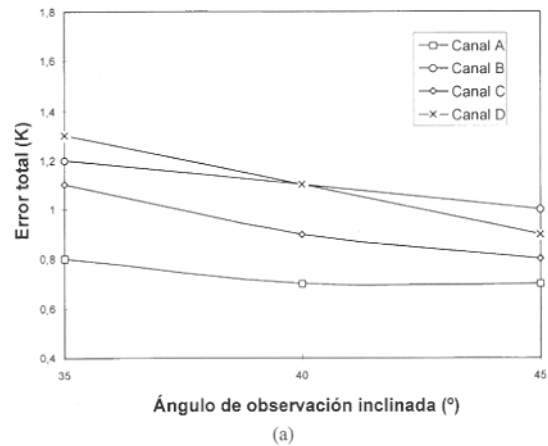
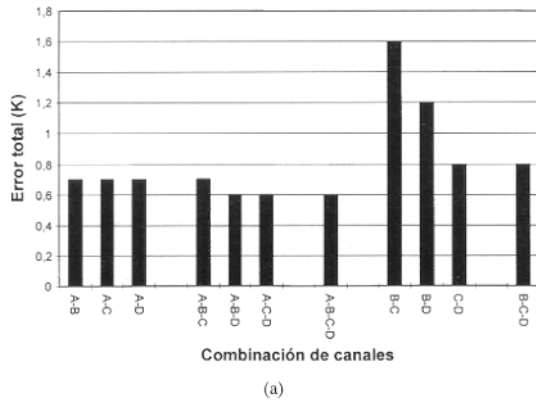


Figura 3. (a) Error total en la temperatura para todas las combinaciones de canales posibles del método split-window. (b) Análisis de contribuciones al error total de la temperatura para el algoritmo split-window.

Figura 4. (a) Error total en la temperatura para el método biangular en función del ángulo de observación inclinada y del canal considerado. (b) Análisis de contribuciones al error total en la temperatura para el algoritmo biangular en función del canal elegido.

Canales	0,7 μm						1,0 μm			1,4 μm		
	1 \ 2	11,0-11,7	11,1-11,8	11,5-12,2	11,6-12,3	11,7-12,4	11,8-12,5	11,3-12,3	11,4-12,4	11,5-12,5	11,0-12,4	11,1-12,5
9,9-10,6		1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4
10,0-10,7		1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0
0,7 μm 10,1-10,8		1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
10,2-10,9		1,4	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
10,3-11,0		1,4	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9
10,4-11,1		1,5	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
1,0 μm 10,2-11,2		1,4	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
10,3-11,3		1,5	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
1,4 μm 10,0-11,4		1,5	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0
10,2-11,6		1,9	1,3	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0

Tabla 1. Errores en la temperatura para diferentes combinaciones de bandas. Se han considerado tres anchuras distintas: 0,7, 1,0 y 1,4 μm . En fondo gris se han indicado las 23 posibles configuraciones óptimas.