

# La medida de la temperatura con el instrumento MUST

E. Valor, V. Caselles, C. Coll, F. Sánchez, E. Rubio y F. Sospedra  
e-mail: *Enric.Valor@uv.es*

*Departament de Tèrmodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València. 46100 Burjassot*

## RESUMEN

Los avances técnicos y metodológicos de los últimos años han extendido el uso de la Teledetección a un amplio conjunto de disciplinas. Esto ha llevado a una mayor presencia de misiones comerciales cuyo principal objetivo es proporcionar productos elaborados con métodos estándar. En este contexto, hemos analizado la viabilidad de un sensor térmico de resolución espacial moderada (240 m), el instrumento MUST, cuya misión es determinar la temperatura de la superficie terrestre. Para ese fin, hemos estudiado la configuración de canales más adecuada, basándonos en la minimización del error en temperatura. Los canales óptimos resultaron ser 10,0-11,0  $\mu\text{m}$  y 11,5-12,5  $\mu\text{m}$ , con los que es posible obtener la temperatura con un error de  $\pm 1,3$  K.

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

## ABSTRACT

Technical and methodological improvements have extended the use of Remote Sensing in the last years. This has led to an increase of commercial missions where the main objective is to provide routinely defined products by using standard procedures. In this context, a new instrument was analyzed: the MediUm scale Surface Temperature (MUST) sensor, with the main objective of providing Land Surface Temperature (LST). To obtain optimal results in LST determination an adequate selection of the band configuration was addressed, which is based on the minimization of the LST retrieval error. From this analysis the band combination 10.0-11.0/11.5-12.5  $\mu\text{m}$  arises as the optimal configuration, which is able to provide LST with an error of  $\pm 1.3$  K.

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

## INTRODUCCIÓN

Desde el lanzamiento de los primeros satélites meteorológicos se han producido importantes avances técnicos y metodológicos en el uso de los datos proporcionados por sistemas de Teledetección. La utilidad de los sensores remotos ha sido demostrada en campos tan diversos como la meteorología, oceanografía, usos del suelo, hidrología, medio ambiente, agricultura, etc. Es por ello que en la actualidad, además del diseño de nuevas misiones estrictamente científicas, se están desarrollando misiones de tipo operativo y comercial basadas en la utilización de técnicas validadas y estandarizadas.

En el marco de esta nueva perspectiva, hemos participado en el estudio de la viabilidad de una nueva misión cuyo principal objetivo es proporcionar productos estándar obtenidos a partir de datos térmicos. El nuevo sensor se ha concebido para la observación de la superficie terrestre, siendo la temperatura la magnitud física primaria a obtener. Con ella se pretende proporcionar aplicaciones orientadas a agricultura (predicción de cosechas, riesgo y detección de heladas), hidrología (balance hídrico, gestión de regadíos), medio ambiente (desertización, isla térmica urbana), etc.

El instrumento se ha diseñado para que tenga la posibilidad de situar dos bandas térmicas de 1  $\mu\text{m}$  de anchura en la región espectral 10-12,5  $\mu\text{m}$ , con una resolución espacial de 240 m al nadir, una periodicidad de 1 a 3 días, y una anchura de barrido de 1400 km con ángulos de observación entre  $+39^\circ$  y  $-39^\circ$  (Duthil y Poilvé, 1998). Se trata pues de un instrumento de resolución espacial moderada (de ahí su nombre *Medium Scale Surface Temperature*, MUST), que puede competir con Thematic Mapper (por su mayor resolución espectral, dos bandas en lugar de una) y con AVHRR (por su mayor resolución espacial, 240 m en lugar de 1.100 m). El sistema de barrido es de tipo *push-broom* y está formado por dos líneas de detectores (una por cada banda), con lo que se evitan las microvibraciones típicas de un sistema tipo *scanner*. Los elementos detectores son microbolómetros, que presentan ciertas ventajas frente a los detectores fotovoltaicos: (i) no necesitan mantenerse a muy bajas temperaturas (50-60 K), (ii) pueden trabajar en un intervalo espectral amplio (los detectores fotovoltaicos tienen limitaciones técnicas para sobrepasar los 12  $\mu\text{m}$ ), y (iii) son considerablemente más económicos. Este tipo de diseño, pues, proporciona la simplicidad y coste

razonables para misiones de naturaleza comercial como la presente.

Nuestra participación en el estudio se centró fundamentalmente en dos aspectos. En primer lugar, efectuamos un análisis de errores para la determinación de la temperatura. El segundo aspecto abordado consistió en el desarrollo de una metodología que permitiese la simulación de imágenes MUST a partir de datos Thematic Mapper (TM). La simulación de dichas imágenes es muy útil para mostrar a los usuarios potenciales lo que este nuevo sensor puede ofrecerles.

El segundo aspecto mencionado ha sido ampliamente estudiado por Valor et al. (2000), mientras que el primer aspecto será objeto del presente trabajo. Para la determinación de la temperatura con el instrumento MUST hemos tenido en cuenta dos tipos de errores: (i) errores asociados al método, y (ii) errores asociados al diseño *pushbroom*.

## ERRORES ASOCIADOS AL MÉTODO

El análisis de los errores asociados al método para el sensor MUST está basado en el estudio realizado con motivo del diseño del instrumento PRISM (Valor et al., 1999).

En aquel estudio la selección se basó en la minimización del error en el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre tras efectuar las correcciones atmosférica y de emisividad. Se consideraron tres fuentes de error: (i) el error asociado al uso del algoritmo *split-window* ( $\delta T_m$ ), (ii) el error debido a la propagación en dicho método de la incertidumbre en la estimación de la emisividad ( $\delta T_e$ ), y (iii) el error debido a la propagación del ruido del sensor ( $\delta T_r$ ). Siguiendo este procedimiento hemos construido la Tabla 1, en la que hemos considerado solamente bandas de 1 11m de

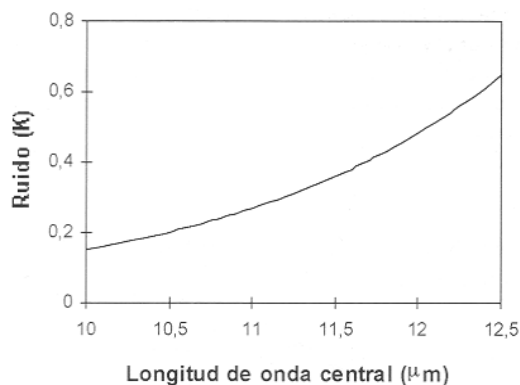


Figura 1. Variación espectral del ruido utilizada en el análisis de errores de las posibles bandas del instrumento MUST.

anchura -caso del MUST. Además, hemos modificado el efecto del ruido (constante para PRISM) para que siga la variación espectral mostrada en la Figura 1 -que es también el caso de MUST.

Podemos ver que el error total disminuye conforme (i) el primer canal está más cerca de 10 11m, y (ii) cuanto más se separan las bandas. Atendiendo a las diferentes fuentes de error,  $\delta T_r$  es siempre la más significativa, seguida de  $\delta T_m$  y siendo  $\delta T_e$  la menos importante. El error asociado al uso del algoritmo es idéntico en todos los casos, pero el ligado a la emisividad y al ruido disminuyen siguiendo la tendencia antes mencionada. En principio hay 5 combinaciones que presentan un error mínimo en la temperatura ( $\pm 1,3$  K). Sin embargo, si comparamos los resultados atendiendo a las diferentes fuentes de error, podemos comprobar que la combinación 10,0-11,0/11,5-12,5  $\mu\text{m}$  es menos sensible a las incertidumbres procedentes de la estimación de la emisividad y del ruido, respectivamente. Ello nos hizo decantarnos finalmente por esta combinación como la más adecuada para el diseño del nuevo sensor.

BANDA 1 (mm)	Fuente de error	BANDA 2 ( $\mu\text{m}$ )		
		11,3-12,3	11,4-12,4	11,5-12,5
10,0-11,0	$\delta T_m(K)$	0,8	0,8	0,8
	$\delta T_e(K)$	0,5	0,4	0,4
	$\delta T_r(K)$	0,9	0,9	0,8
	$\delta T(K)$	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
10,1-11,1	$\delta T_m(K)$	0,8	0,8	0,8
	$\delta T_e(K)$	0,6	0,5	0,5
	$\delta T_r(K)$	1,0	1,0	0,9
	$\delta T(K)$	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
10,2-11,2	$\delta T_m(K)$	0,8	0,8	0,8
	$\delta T_e(K)$	0,6	0,5	0,5
	$\delta T_r(K)$	1,1	1,1	1,0
	$\delta T(K)$	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
10,3-11,3	$\delta T_m(K)$	0,8	0,8	0,8
	$\delta T_e(K)$	0,6	0,5	0,5
	$\delta T_r(K)$	1,2	1,2	1,1
	$\delta T(K)$	<b>1,6</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>

Tabla 1. Análisis de errores para diferentes combinaciones de bandas. Se muestran el error debido al algoritmo *splitwindow* ( $\delta T_m$ ), a la incertidumbre en la emisividad ( $\delta T_e$ ) y a la propagación del ruido ( $\delta T_r$ ), así como el error total ( $\delta T$ ).

## ERRORES ASOCIADOS ALPUSHBROOM

El diseño *pushbroom* consiste en que cada canal está formado por una línea de N detectores, de modo que se registran simultáneamente las medidas realizadas en N píxeles consecutivos sobre la superficie observada (Joseph, 1996). De esta forma, mientras el satélite recorre su órbita, el instrumento barre la superficie "a líneas".

Puesto que MUST dispone de dos canales, cada uno tiene una línea de detectores que están físicamente desplazadas una cierta distancia, lo que provoca que las dos bandas no observen la misma área al mismo tiempo, ni con las mismas condiciones de observación. Estas diferencias de observación pueden modificar la diferencia entre las temperaturas medidas por los dos canales, de modo que ésta ya no se debe exclusivamente a la absorción diferencial, como debe ocurrir cuando aplicamos un método de tipo *split-window*. La perturbación en la diferencia de temperaturas afecta, por tanto, a la corrección atmosférica, introduciendo un nuevo error que debe ser cuantificado. En este estudio hemos utilizado una ecuación *splitwindow* de tipo cuadrático, cuya expresión viene dada por (Coll y Caselles, 1997):

$$T = T_1 + [A + B(T_1 - T_2)(T_1 - T_2) + C(1 - \epsilon) + D\Delta\epsilon + E] \quad (1)$$

donde T es la temperatura de la superficie terrestre,  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas radiométricas medidas por las dos bandas del instrumento,  $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$  es la emisividad media en dichas bandas,  $\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$  es la diferencia espectral de emisividad entre ambos canales, y A, B, C, D, y E son coeficientes empíricos que dependen del par de bandas seleccionadas.

En este algoritmo la propagación del error introducido en la diferencia de temperaturas,  $\delta(T_1 - T_2)$ , conduce a un error dado por:

$$\delta T_{pb} = [A + 2B(T_1 - T_2)]\delta(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Para evaluar  $\delta T_{pb}$  hemos de determinar  $\delta(T_1 - T_2)$  teniendo en cuenta los diferentes factores que pueden afectar a esta diferencia, y que son: (i) defectos de registrado entre ambas bandas, (ii) ángulos de observación distintos para cada canal, y (iii) el retardo temporal en la medida efectuada por ambos canales.

### Defectos de registrado

Este error,  $\delta(T_1 - T_2)_{reg}$ , se debe a un desplazamiento entre los píxeles medidos en los dos canales, de modo que quedan superpuestos puntos de medida que en realidad no corresponden a la misma área sobre el suelo. Puede resultar importante

en superficies heterogéneas donde ambos canales no miden exactamente sobre el mismo objeto.

Hemos estimado este error usando imágenes simuladas del sensor MUST, obtenidas a partir de datos TM sobre la provincia de Valencia. Tomando la banda 1 como referencia, hemos provocado desplazamientos aleatorios de  $\pm 0,3$  píxeles en la banda 2, pues éste es el máximo desplazamiento previsto para este instrumento (Duthil y Poilvé, 1998). Una vez hecho esto, se ha calculado  $(T_1 - T_2)$  con las bandas originales, y sustituyendo la banda 2 por la desplazada, y hemos estimado píxel a píxel el error introducido en  $(T_1 - T_2)$ , obteniéndose  $\delta(T_1 - T_2)_{reg} = \pm 0,16$  K.

### Ángulos de observación diferentes

Este error,  $\delta(T_1 - T_2)_{ang}$ , es debido a que los dos canales observan la misma superficie con ángulos de observación ligeramente distintos. MUST está diseñado de modo que la banda 1 observa hacia delante en la dirección de movimiento de la plataforma, mientras que la banda 2 mira hacia atrás la 1 misma superficie, existiendo una diferencia máxima de  $2,4^\circ$  entre ambos canales (Duthil y Poilvé, (1998). Además, la superficie es observada a través de dos caminos ópticos diferentes que se encuentran separados 70 km a nivel del satélite. Esto puede afectar a  $(T_1 - T_2)$  de dos modos: (i) puesto que la superficie se observa con dos ángulos distintos, la definición física de la temperatura en el caso de una superficie heterogénea puede cambiar (pues se observan fracciones diferentes de vegetación y suelo, por ejemplo); y (ii) la influencia de la atmósfera podría ser diferente a través de los dos caminos ópticos.

En relación al primer aspecto, si consideramos que la superficie observada es horizontal, la diferencia de  $2,4^\circ$  en el ángulo de observación implica que este ángulo es de  $+1,2^\circ$  para la banda 1 y de  $-1,2^\circ$  para la banda 2 en la dirección del movimiento de la plataforma (ver Figura 2a). Suponiendo que la superficie sea heterogénea, que la vegetación esté regularmente distribuida y que el efecto de sombra sea despreciable (observación próxima al mediodía), las dos bandas observarán el mismo sistema radiativo desde ambas posiciones, tal como se aprecia en la Figura 2a. Ahora bien, si la superficie presenta un desnivel los ángulos de observación serán ligeramente diferentes (ver Figura 2b). De hecho,  $\theta_1 = \delta + 1,2$  y  $\theta_2 = \delta - 1,2$ , tal como se infiere de dicha figura. Esto supone que el sistema radiativo observado es distinto, con lo que su temperatura efectiva también lo será. Para evaluar el error introducido por este efecto, hemos utilizado el modelo propuesto por Caselles y Sobrino (1989), que define la temperatura efectiva (T) de una superficie heterogénea y rugosa como:

$$T = (1 - b)T_v + bT_s \quad (3)$$

donde  $T_v$  y  $T_s$  son las temperaturas de la vegetación y del suelo, respectivamente, y  $b$  es un factor de peso dado por

$$b = \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon} \right) [P_s + (1 - \epsilon_v)GP_p] \quad (4)$$

siendo  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_v$ , y  $\epsilon$  la emisividad del suelo, de la vegetación y la efectiva del sistema,  $P_s$  y  $P_p$  las proporciones de suelo y de pared observadas por el sensor, y  $G$  es un factor de forma que depende de la estructura geométrica de la superficie. Si rescribimos esta ecuación poniendo  $T_s = T_v + \Delta T$ , donde  $\Delta T$  es la diferencia entre las temperaturas de suelo y vegetación, obtenemos:

$$T = T_v + b\Delta T \quad (5)$$

Puesto que el cambio en la definición de la temperatura sólo se debe a la variación en las condiciones de observación (que modifica el parámetro  $b$ ), el error en la diferencia de temperatura será finalmente

$$\delta(T_1 - T_2)_{\text{ang}} = (b_1 - b_2)\Delta T \quad (6)$$

donde  $b_1$  y  $b_2$  son los valores de  $b$  para  $\theta_1$  y el  $\theta_2$ , respectivamente.

Para estimar este error hemos considerado valores típicos de emisividad ( $\epsilon_s = 0,960$ ,  $\epsilon_v = 0,985$ ), diferentes tipos de estructuras vegetales (con razones de aspecto altura/anchura entre 0,08 y 10, y valores del porcentaje de cobertura vegetal entre 0,2 y 0,8), distintos valores de  $\Delta T$  (0 °C a 20 °C), y diferentes pendientes  $\delta$  (0° a 30°). Además, hemos utilizado un modelo geométrico de la superficie de elementos vegetales en forma de caja y regularmente distribuidos sobre la misma (Colton, 1996). En término medio, los cálculos arrojan un error asociado a esta fuente de error  $\delta(T_1 - T_2)_{\text{ang}} = \pm 0,09$  K.

En cuanto al otro aspecto (los distintos caminos ópticos a través de los que se observa la superficie), debemos tener en cuenta que la principal contribución atmosférica a la absorción se debe al vapor de agua, que se concentra en los primeros 2 km de atmósfera. Considerando esta altitud y la diferencia angular máxima de 2,4° antes mencionada, la máxima diferencia espacial entre los dos caminos ópticos considerados es de 80 m. En esta pequeña distancia, los posibles cambios que puedan encontrarse en la atmósfera no son lo bastante significativos como para modificar perceptiblemente las observaciones efectuadas por los dos canales.

### Retardo temporal

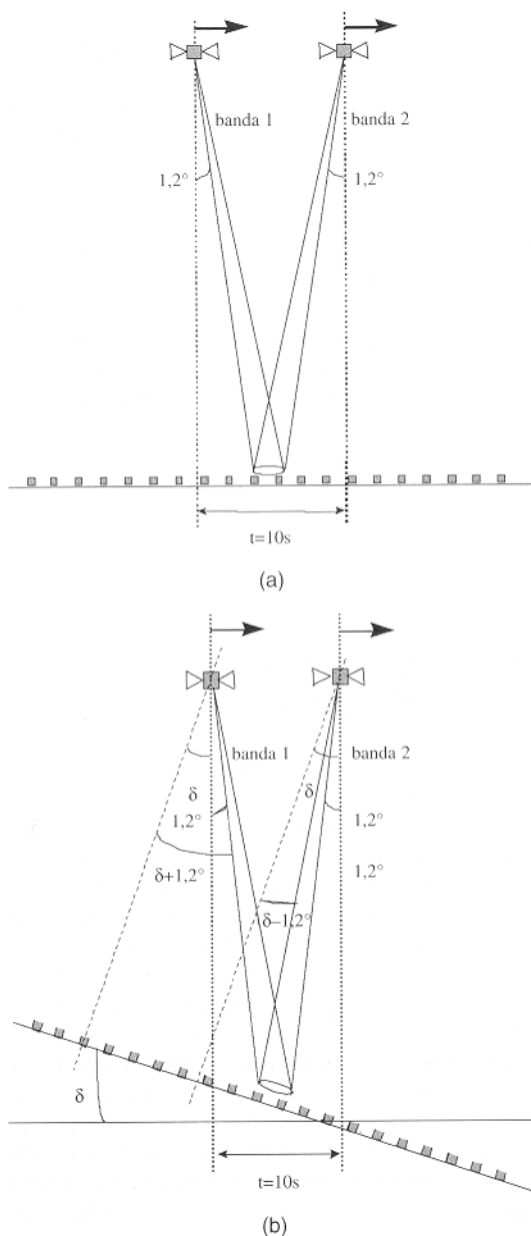


Figura 2. Condiciones de observación del instrumento MUST en el caso de una superficie horizontal (a) y en el caso de una superficie con una inclinación  $\delta$  (b).

Este error,  $\delta(T_1 - T_2)_t$ , es debido a que ambas bandas miden sobre la misma superficie con una diferencia de tiempo de 10 s (Duthil y Poilvé, 1998). En este intervalo de tiempo la temperatura de los elementos de la superficie puede cambiar, de modo que la temperatura efectiva del sistema también lo hará. Para estimar este efecto realizamos una experiencia en la que medimos las variaciones de temperatura de diferentes superficies a intervalos de 10 s. Las experiencias se llevaron a cabo en condiciones de cielo despejado y viento leve, a la hora de paso prevista para MUST, alrededor de las 10:30 AM. Las medidas de temperatura se realizaron con un radiómetro de banda ancha (8-14  $\mu\text{m}$ ), sobre suelo y vegetación secos y húmedos, y también en condiciones de sombra y sol (8 casos en total). En cada caso tomamos 50

medidas a intervalos regulares de 10 s, de las que calculamos las diferencias entre medidas consecutivas. Como ejemplo, la Figura 3 muestra las diferencias obtenidas para suelo seco al sol.

Como resultado de esta experiencia obtuvimos en el caso de los suelos diferencias de temperatura con una desviación estándar de  $\pm 0,11$  K. En la vegetación, las diferencias presentaron una desviación estándar de  $\pm 0,2$  K. Puesto que estos resultados corresponden a píxeles puros, en el caso de píxeles heterogéneos (con un 50% de vegetación) hicimos una estimación de este error utilizando de nuevo el modelo de Caselles y Sobrino (1989). A partir de la ecuación (3) el error en temperatura debido a una variación en  $T_s(\Delta T_s)$  y en  $T_v(\Delta T_v)$  es:

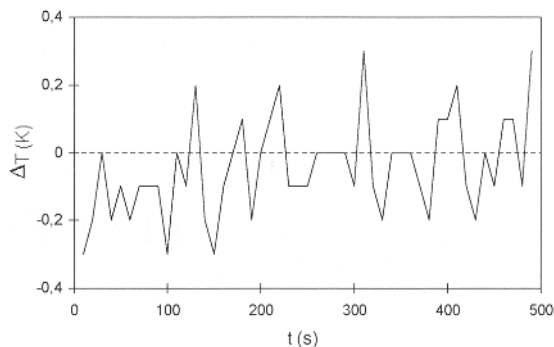
$$\Delta T = (1-b)\Delta T_v + b\Delta T \quad (7)$$

Las variaciones  $\Delta T_v$  y  $\Delta T_s$  han sido generadas aleatoriamente utilizando una distribución de Gauss cuyas desviaciones son las obtenidas de la experiencia. De los cálculos efectuados se desprende que el error debido a esta fuente, en el caso de píxeles mixtos, es de  $\pm 0,1$  K.

De las tres fuentes de incertidumbre analizadas, la más significativa es aquella relacionada con el registrado ( $\pm 0,16$  K), con un valor un 50% mayor que las otras dos ( $\pm 0,1$  K). Si tenemos en cuenta que las tres fuentes de error son independientes, el error total en la diferencia de temperatura es:

$$\delta(T_1 - T_2) = [\delta(T_1 - T_2)_{\text{reg}}^2 + \delta(T_1 - T_2)_{\text{ang}}^2 + \delta(T_1 - T_2)_t^2]^{1/2} \quad (8)$$

que para los valores calculados en los tres casos es  $\delta(T_1 - T_2) = \pm 0,2$  K. Introduciendo este valor en la ecuación (2) el error final asociado al diseño del instrumento es  $\delta T_{\text{pb}} = \pm 0,3$  K. Si comparamos este valor con las otras tres fuentes de error (ver Tabla 1), podemos observar que es la fuente menos importante. De hecho la introducción de este error en el cómputo global no modifica el valor de  $\pm 1,3$  K obtenido en el apartado anterior.



**Figura 3.** Diferencias de temperatura consecutivas,  $\Delta T$  (K), medidas en intervalos de 10 s, en el caso de un suelo seco soleado.

## CONCLUSIONES

Hemos analizado desde un punto de vista físico el diseño del instrumento MUST, cuyo principal objetivo es proporcionar productos elaborados con métodos estándar a partir de la medida de la temperatura. Para asegurar los mejores resultados, se ha efectuado una selección de las bandas óptimas para el instrumento, de modo que se minimice el error en la determinación de la temperatura. La combinación de canales más adecuada ha resultado ser: 10,0-11,0  $\mu\text{m}$  como banda 1, y 11,5-12,5  $\mu\text{m}$  como banda 2, la cual permite obtener la temperatura con un error de  $\pm 1,3$  K.

Adicionalmente, hemos analizado la influencia en la selección de bandas de otras fuentes de error ligadas al diseño de MUST como *pushbroom*. Del análisis se desprende que el mayor impacto se debe a defectos en el registrado de las imágenes aunque en conjunto el efecto en el error final de la temperatura, y por tanto en la selección de bandas, es despreciable.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Comisión de las Comunidades Europeas (proyecto ENV 4-CT96-0331), y a la CICYT (proyecto AMB96-1928-CE) la financiación recibida para llevar a cabo este estudio. Asimismo, deseamos expresar nuestra gratitud a los Drs. P. Duthil y D. Dubet (Matra Marconi Space, Toulouse, Francia) por sus útiles comentarios y ayuda en las cuestiones técnicas del instrumento MUST.

## BIBLIOGRAFIA

- CASELLES, V. y SOBRINO, J.A. 1989. Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 A VHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 29: 135-146.
- 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(D14): 16,697-16,713.
- COLTON, A. 1996. Effective thermal parameters for a heterogeneous land surface. *Remote Sensing of Environment*. 57: 143-160.
- DUTHIL, P. y POILVÉ, H. 1998. MediUm Scale Surface Temperature (MUST): Mission and system definition synthesis. Matra Marconi Space, Toulouse, Francia (Ref. AP/NT/PhD/053.97).
- JOSEPH, G. 1996. Imaging Sensors for Remote Sensing. *Remote Sensing Reviews*. 13: 257-342.
- VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., RUBIO, E. y SOSPEDRA, F. 1999. Selección de las bandas técnicas del instrumento PRISM. *Revista de Teledetección*. 11: 23-27.
- VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., SÁNCHEZ, F., RUBIO, E. y SOSPEDRA, F. 2000. Simulation of a Medium-Scale-Surface Temperature instrument from Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* (en prensa).