TELEDETECCIÓN. Usos y Aplicaciones. VII Congreso Nacional de Teledetección. Valladolid, España, 1997. pp. 487-492.
Editores: José Luis Casanova y Julia Sanz Justo

LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA Y DE LA EMISIVIDAD DESDE SATELITES: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS

V. Caselles Miralles, C. Coll Company, E. Rubio Caballero, F. Sospedra Arnau y E. Valor i Micó.
Grupo de Teledetección. Departamento de Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia. C/. Doctor Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia). Tel.: (96) 3864350; Fax: (96) 3642345; e-mails: Cesar.Coll@uv.es; Enric.Valor@uv.es; Eva.M.Rubio@uv.es; Francisco.Sospedra@uv.es.

RESUMEN.- En este trabajo se presentan dos modelos operativos para la determinación desde satélite de la temperatura y de la emisividad de la superficie del suelo. Ambos modelos se han desarrollado para que se puedan aplicar a cualquier situación y zona, es decir, tienen carácter universal. También hemos apuntado algunas perspectivas futuras: método de corrección atmosférica para imágenes Landsat-TM, optimización de las bandas de split-window y desarrollo de un algoritmo de detección de nubes.

ABSTRACT.- In this paper two operational models for determining land surface emissivity and temperature using satellite data have been presented. Both models were developed with universal character, that is, they can be applied in any situation and area. Some future prospects have also been point out: an atmospheric correction method for Landsat-TM images, optimization of the split-window bands, and development of a cloud detection algorithm.

1.- INTRODUCCION

Es bien sabido que la temperatura juega un papel importante en un gran número de fenómenos; los modelos climáticos, la circulación oceánica, los modelos de predicción de pesca, el balance energético en superficie, el balance hídrico de una zona, los modelos de uso y control de recursos acuíferos, los esquemas agronómicos, etc., utilizan la temperatura como un parámetro de entrada, y en muchos casos la precisión del modelo va a depender en gran medida de la precisión con que podemos conocer la temperatura de la superficie del suelo o del mar. Para nosotros, el caso del mar es un caso particular de la tierra, es decir, que el modelo utilizado debe tener un carácter general y permitir determinar la temperatura tanto de la superficie del suelo como de la superficie del mar. Y además el modelo debe ser independiente de las condiciones atmosféricas de la zona; debe poderse aplicar tanto en verano como en invierno, y tanto en latitudes medias como en zonas tropicales; en dos palabras el modelo debe ser general y global. Esta es la filosofía que venimos manteniendo desde la IV Reunión Científica de la AET, celebrada en Sevilla (Caselles et al. 1991).
Los objetivos, pues, de este trabajo son los siguientes: (1) actualizar la metodología que hemos publicado recientemente en las actas de la V Reunión Científica de la AET y en la Revista de Teledetección, (2) proponer un método que permite el cartografiado de la emisividad de forma totalmente operativa, y (3) comentar las líneas generales de la investigación futura en este campo. Los dos primeros puntos describen el estado actual de

la medida de la temperatura mientras que el último detalla cuales son las perspectivas futuras.

2.- METODOLOGIA

El modelo que proponemos para la determinación de la temperatura de una forma totalmente operativa se basa en las siguientes ecuaciones:

$$T=T_1+A(T_1-T_2)+B \tag{1}$$

donde T es la temperatura de la superficie del suelo o del mar, T_1 y T_2 son las medidas realizadas por el satélite en dos canales contiguos situados dentro de la ventana espectral 10.5-12.5 μm, como por ejemplo los canales 4 y 5 del AVHRR del NOAA o del ATSR del ERS-1, A y B son dos coeficientes que evalúan el efecto de la atmósfera y de la emisividad y vienen dados por (Caselles et al. 1995):

$$A=1.0+0.58(T_1-T_2) \tag{2}$$

$$B=0.51+40(1-\epsilon)-75\Delta\epsilon \tag{3}$$

donde $\epsilon=(\epsilon_1+\epsilon_2)/2$ y $\Delta\epsilon=\epsilon_1-\epsilon_2$, siendo ϵ_1 y ϵ_2 el valor de las emisividades en los canales 1 y 2. La ventaja de la ecuación (3) respecto de la misma ecuación en anteriores trabajos es que ahora el coeficiente de $\Delta\epsilon$ tiene un valor fijo, independiente del contenido en vapor de agua de la atmósfera. Esto hace que el modelo gane en operatividad sin perder precisión.
La validación y aplicación de este modelo en diferentes zonas ha sido objeto de estudio en trabajos anteriores (Caselles et al. 1993), en los que se ha mostrado que su precisión en la determinación de la temperatura es de 1.1 °C para la superficie del suelo y de 0.7 °C para la superficie del mar, en latitudes medias. Una intercomparación con otros modelos del tipo split-window, ha mostrado que el modelo propuesto es el más preciso y exacto de cuantos se han desarrollado hasta el momento (Prata et al. 1995).

3.- CARTOGRAFIADO DE LA EMISIVIDAD

Para que la ecuación (3) sea operativa, necesitamos desarrollar un método que nos permita obtener ϵ y $\Delta\epsilon$ utilizando datos de teledetección, como por ejemplo una imagen del NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). Las bases físicas del modelo son las ecuaciones (Caselles y Sobrino, 1989):

$$\epsilon=P_v\epsilon_v+(1-P_v)\epsilon_g+d\epsilon \tag{4}$$

$$\Delta\epsilon=P_v\Delta\epsilon_v+(1-P_v)\Delta\epsilon_g+d\Delta\epsilon \tag{5}$$

donde P_v es la proporción de la vegetación, que se puede derivar a partir de una imagen de NDVI siguiendo la ecuación (Valor y Caselles, 1996):

$$P_v=\frac{\left(1-\frac{i}{i_g}\right)}{\left(1-\frac{i}{i_g}\right)-k\left(1-\frac{i}{i_v}\right)} \tag{6}$$

donde i es el NDVI, i_g e i_v son los NDVI del suelo y de la vegetación respectivamente y $K=(\rho_{2v}-\rho_{1v})/(\rho_{2g}-\rho_{1g})$, siendo ρ_{1v}, ρ_{2v}, ρ_{1g} y ρ_{2g} las reflectividades de la vegetación y el suelo en los canales 1 y 2 del AVHRR, que se obtienen también de la imagen (píxeles de suelo desnudo y vegetación).

Los términos $d\epsilon$ y $d\Delta\epsilon$ evalúan, respectivamente, los efectos de cavidad de ϵ y $\Delta\epsilon$; se pueden determinar a partir de las características geométricas de los cultivos (Tabla I) y son los responsables de que las ecuaciones (4) y (5) sean curvas más o menos acusadas.

Superficie	H	L	S	$d\epsilon$
Herbáceos	0.2	2	1	0.004
Arbustos	1	1	1	0.016
Monte Bajo	0.5	1	0.5	0.013
Frutales	3	3	2	0.016
Pinar	5	1	1	0.025

Tabla I.- Valores de $d\epsilon$ para diferentes superficies. Hy L son la altura y diámetro de las plantas; S es la separación entre plantas yárboles (Valor y Caselles, 1996). Las unidades en que vienen dadas las dimensiones de los cultivos son en metros.

Para poder aplicar las ecuaciones (4) y (5) necesitamos conocer los valores de la emisividad del suelo, ϵ_g, y de la vegetación, ϵ_v, así como sus diferencias espectrales, $\Delta\epsilon_g$ y $\Delta\epsilon_v$. La única posibilidad de hacer esto de forma operativa es construir un fichero con estos valores para diferentes tipos de vegetación y suelo. A partir de distintas experiencias de campo, en las que hemos realizado numerosas medidas de emisividad, se ha construido la tabla II en la que mostramos los valores de ϵ y $\Delta\epsilon$ para 7 clases diferentes: herbáceas secas, árboles, arbustos, herbáceas verdes, suelos arenosos, suelos limosos y suelos arcillosos. Ver el trabajo de Rubio et al. (1996) para más detalles.

Superficie	ϵ	$\Delta\epsilon$
Herbáceos secos	0.952 ± 0.021	-0.005 ± 0.007
Arboles	0.983 ± 0.009	-0.002 ± 0.007
Arbustos	0.985 ± 0.013	-0.001 ± 0.007
Herbáceos verdes	0.985 ± 0.015	-0.001 ± 0.007
Suelos arenosos	0.968 ± 0.005	-0.014 ± 0.003
Suelos limosos	0.972 ± 0.005	-0.008 ± 0.002
Suelos arcillosos	0.974 ± 0.005	-0.005 ± 0.002

Tabla II.- Valores de ϵ y $\Delta\epsilon$ para diferentes superficies. Se indica el valor medio y el error (dispersión típica) de las medidas realizadas (Rubio et al. 1996).

En resumen, pues, para determinar una mapa de ϵ y $\Delta\epsilon$ para la zona de interés, tomaremos los valores de ϵ_v, $\Delta\epsilon_v$, ϵ_g, $\Delta\epsilon_g$ de la tabla II y calcularemos los valores de $d\epsilon$ y $d\Delta\epsilon$ a partir de las dimensiones de las estructuras vegetales presentes en la zona de estudio y de la información contenida en la tabla I. Así pues, el proceso no reviste mayor dificultad. No obstante, existe un programa que realiza todo el proceso de forma automática y que los

autores de este trabajo ponen a disposición del lector interesado.

4.- INVESTIGACION FUTURA: PRIMEROS RESULTADOS

Aunque mucho camino tenemos ya recorrido, aún quedan algunos aspectos que impiden que la medida de la temperatura sea todo lo precisa y comercial que puede ser. El objetivo de este apartado es señalar estos aspectos y en algunos casos mostrar unos primeros resultados obtenidos en nuestro grupo.

4.1.- Procesado de Landsat-TM

Como hemos comentado anteriormente la única posibilidad de procesar las imágenes Landsat-TM es mediante un modelo monocanal y los datos de radiosondeos, tomados en el lugar y hora de paso del satélite. Esto es prácticamente imposible pues los radiosondeos se hacen normalmente a las 12.00 TMG y el Landsat pasa sobre las 10.00 TMG. Estas dos horas de diferencia pueden producir errores de tipo sistemático en el cálculo de la temperatura que en la mayoría de los casos son del 100 % o más. ¿Qué podemos hacer con la gran cantidad de información existente? La única posibilidad es idear un método alternativo, que sin utilizar los radiosondeos, permite procesar las imágenes existentes, aunque sea de forma relativa. Un primer intento en esta línea se ha realizado partiendo de la idea de que la corrección atmosférica es lineal (Coll et al. 1994):

$$T^*=aT-b \tag{7}$$

donde T^* es la temperatura corregida del efecto atmosférico, T es la temperatura medida por el satélite, y a y b son dos constantes empíricas que varían con la imagen y que se pueden determinar si conocemos la temperatura de dos puntos en la imagen: un punto de suelo desnudo y seco (temperatura alta) y otro de vegetación regada (temperatura baja). Estos valores pueden obtenerse resolviendo la ecuación de balance energético con los registros meteorológicos de la zona (Hurtado et al. 1996).

4.2.- Detección de nubes

Los algoritmos hasta ahora desarrollados trabajan de forma subjetiva, pues han de fijarse unos umbrales que no son únicos, cambian con cada imagen (ver el trabajo presentado por Badenas et al. (1996) en esta Reunión). Esto impide que la detección y posterior eliminación de nubes se pueda hacer de forma automática. Además, los algoritmos desarrollados son aplicables en zonas de latitudes medias y producen errores importantes cuando se aplican en zonas tropicales. Para tratar de paliar este problema, hemos empezado a desarrollar un modelo de balance radiativo que incorpora la presencia de nubes (ver esquema de la figura 1), y que confiamos que sea aplicable en cualquier zona y que la definición de umbrales se haga de forma automática, es decir, basándose en un modelo físico y no en el criterio del observador.
La radiancia que llega al satélite se puede escribir como:

$$L=P_nL_n+(1-P_n)L_s \tag{8}$$

donde P_n es la proporción de píxel que cubren las nubes, L_n es la radiancia que llega al satélite desde la parte cubierta del píxel y L_s es la radiancia que llega al satélite desde la parte

despejada del píxel. Tanto L_n como L_s tienen en cuenta tanto contribuciones emitidas directamente por ellas como reflexiones procedentes de la otra parte y de la atmósfera. Así L_n será la suma de los términos 1,2,3,4 y 5 y L_s considera la adición de los sumandos 6 y 7.

5.- CONCLUSIONES

A modo de resumen de lo expuesto anteriormente, podemos entresacar las siguientes conclusiones:
(1) Hemos desarrollado un modelo operativo y universal para la determinación de la temperatura que permite calcular la temperatura de la superficie del suelo (mar) con un error de 1.1 (0.7) K.
(2) Hemos expuesto un modelo casi operativo y con carácter universal para cartografiar la emisividad, el cual permite averiguar la emisividad de la superficie del suelo con un error del 0.5 al 2 %, dependiendo del conocimiento que tengamos de la zona.
(3) Para el procesado de las imágenes térmicas del TM (canal 6) se ha propuesto un método alternativo que se puede aplicar en zonas donde se tenga un registro de datos meteorológicos.
(4) Las ideas básicas de un algoritmo que permite detectar las nubes de forma totalmente objetiva han sido también expuestas, el cual se basa en un modelo de transferencia radiativa que incorpora la presencia de nubes.

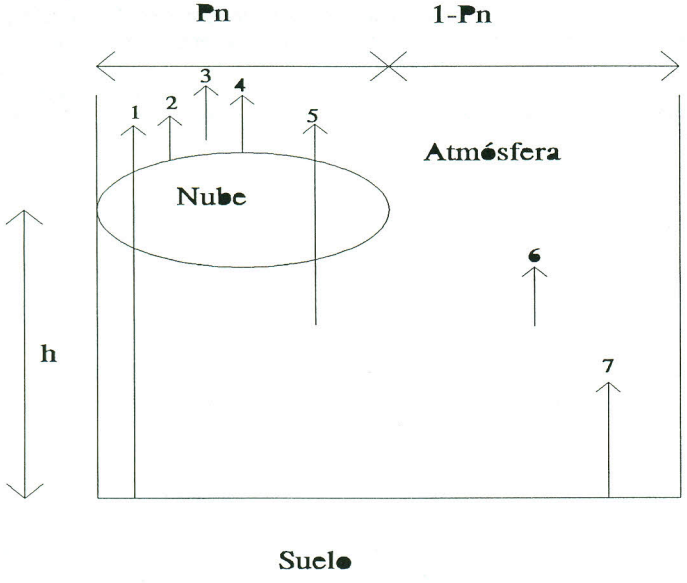

Figura 1.- Esquema del balance radiativo en un pixel parcialmente cubierto. P_n es la proporción de cobertura nubosa, $(1-P_n)$ la proporción de suelo (zona despejada) y h es altura a la que se encuentra la nube.

6.- AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestra gratitud a la Comisión de Comunidades Europeas (Contratos EPOC-CT90-0030, EV5V-CT91-0033, EV5V-CT91-0035 y TS3-CT-0239) y a la CICyT

(Proyecto AMB94-1208) por la financiación concedida, sin la cual no hubiera sido posible la realización del presente trabajo.

7.- REFERENCIAS

Badenas, C., Estrela, M.J., Marchuet, R. y Caselles, V. 1996. Obtención de mapas de temperatura superficial del agua del mar a partir de imágenes NOAA transmitidas en formato ATP. En *VI Reunión Científica de la AET*. Valladolid (en este volumen).

Caselles, V. and Sobrino, J.A. 1989. Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data. *Remote Sens. Environm.* **29**: 135-146.

Caselles, V., Coll, C., Valor , E., Sobrino, J.A. y Diez, S. 1991. Algunas sugerencias sobre el método split-window para determinar la temperatura superficial del mar. En *IV Reunión Científica de la AET*. Sevilla. pp 324-328.

Caselles, V., Badenas, C., Coll, C., Rubio, E., Sobrino, J.A. y Valor, E. 1993. La utilidad del infrarrojo térmico en el estudio de la degradación de la superficie de la tierra. Primeros resultados de los proyectos EFEDA, HAPEX-SAHEL y DEMON. En *V Reunión Científica de la AET*. Las Palmas de Gran Canaria. (en prensa).

Caselles, V., Coll, C., Valor, E. and Rubio, E. 1995. Mapping land surface emissivity using AVHRR data. Application to La Mancha, Spain. *Remote Sens. Rev.* **12**:311-333.

Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J.A. and Valor, E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Int. J. Remote Sens.* **15**:105-122.

Hurtado, E., Vidal, A. and Caselles, V. 1996. Comparison of two atmospheric correction methods for Landsat TM thermal band. *Int. J. Remote Sens.* (in press).

Prata, A.J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J.A. and Ottlé, C. 1995. Thermal remote Sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote Sens. Rev.* **12**:175-224.

Rubio, E., Caselles, V. and Badenas, C. 1996. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm waveband. Analysis of two field methods. *Remote Sens. Environm.* (in press).

Valor, E. and Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African and South-American areas. *Remote Sens. Environm.* (in press).