

## Un método alternativo de corrección atmosférica

M.J. LOPEZ GARCIA y V. CASELLES

### RESUMEN

Un gran número de los estudios en teledetección requieren que los datos que las imágenes digitales se transformen en las magnitudes físicas correspondientes. Dentro de este proceso de conversión, la corrección atmosférica constituye un aspecto fundamental, el cual generalmente se lleva a cabo mediante uno de los modelos de transferencia radiativa a través de la atmósfera. La principal dificultad a la hora de aplicar estos modelos se debe a la necesidad de datos de perfiles atmosféricos ya que, con relativa frecuencia, no se encuentran disponibles. En esta comunicación presentamos un modelo alternativo de corrección atmosférica, basado en la idea de que los efectos atmosféricos existentes entre dos o más imágenes pueden ser determinados de forma relativa, tomando una imagen como referencia, mediante una función lineal. Esta función se obtiene a partir de los valores de reflectividad aparente procedentes de la imagen para superficies cuya reflectividad en el

suelo pueda considerarse invariable en el tiempo. Este método de corrección se aplicó para corregir las imágenes Landsat 5 Thematic Mapper de dos fechas diferentes, obteniéndose resultados satisfactorios, comparables a los que se obtienen de aplicar modelos de corrección tradicionales.

### 1.- INTRODUCCION

Generalmente, los datos utilizados en teledetección llegan al usuario en forma de números digitales, los cuales no se corresponden en sentido estricto con las magnitudes físicas (radiancia, temperatura, reflectividad) que obtendríamos directamente de la superficie terrestre. Por ello, ciertos estudios tales como los que intentan establecer relaciones cuantitativas entre los datos proporcionados por la imagen y las características superficiales del suelo, aquellos que se basan en la caracterización de *signaturas espectrales*, o bien aquellos estudios, cada día más

extendidos, que emplean imágenes multitemporales, requieren la conversión de los números digitales en las correspondientes magnitudes físicas (Robinove, 1982). De esta forma los resultados obtenidos serán más ventajosos al permitir la comparación de los datos obtenidos a partir de imágenes procedentes de diferentes sensores, escenas o fechas (Price, 1987).

Centrándonos en las longitudes de onda correspondientes al espectro solar (0,4 - 3,0  $\mu\text{m}$ ), la conversión de la imagen digital proporcionada por el satélite en los valores de reflectividad tal y como se obtendrían en la superficie del suelo tiene lugar mediante diferentes cálculos, los cuales pueden ser esquematizados (figura 1) en 3 procesos:

- (1) Conversión de los valores digitales en radiancia ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ). Los niveles digitales están relacionados con la radiancia que llega al sensor mediante un modelo lineal (calibrado), cuyos coeficientes son dependientes de la longitud de onda y de las características del sensor.
- (2) Conversión de los valores de radiancia en reflectividad aparente (reflectividad del sistema suelo-atmósfera). Para ello basta considerar la energía solar incidente, la cual depende de la longitud de onda y del ángulo solar zenital.
- (3) Finalmente, la conversión de los valores de reflectividad aparente a

nivel de satélite en valores de reflectividad tal y como se obtendrían en la superficie del suelo. Para ello es necesario eliminar los efectos perturbadores que introduce la atmósfera y que dependen de su composición, de la longitud de onda y de la geometría de observación (Bariou *et al.*, 1985; Rollin *et al.*, 1985).

La corrección atmosférica es un problema complejo que exige resolver la ecuación de transferencia radiativa a través de la atmósfera, para lo cual se han propuesto diferentes soluciones. Existen modelos atmosféricos simplificados que calculan la difusión y absorción atmosférica mediante el empleo de los datos de perfiles atmosféricos (Chandrasekhar, 1950; Turner and Spencer, 1972; Kneizys *et al.*, 1980; Aranuvachapun, 1983, 1986; Deschamps *et al.*, 1982), pero la principal dificultad de aplicar estos modelos surge de la no disponibilidad de radiosondeos en los lugares en los que se requiere realizar la corrección. Otros modelos no utilizan datos de radiosondeo sino que suponen la existencia de una relación lineal entre la corrección a efectuar y las diferencias en la radiancia observada bien sea entre varios canales (Gordon, 1978; Gordon and Clark, 1980; Lambeck *et al.*, 1978), entre medidas tomadas a diferentes alturas (Steven *et al.*, 1984; Steven and Rollin, 1985) o bien entre medidas tomadas con diferentes ángulos de observación (Sun and Minnett, 1982; Khosraviani and Cracknell, 1984). Finalmente,

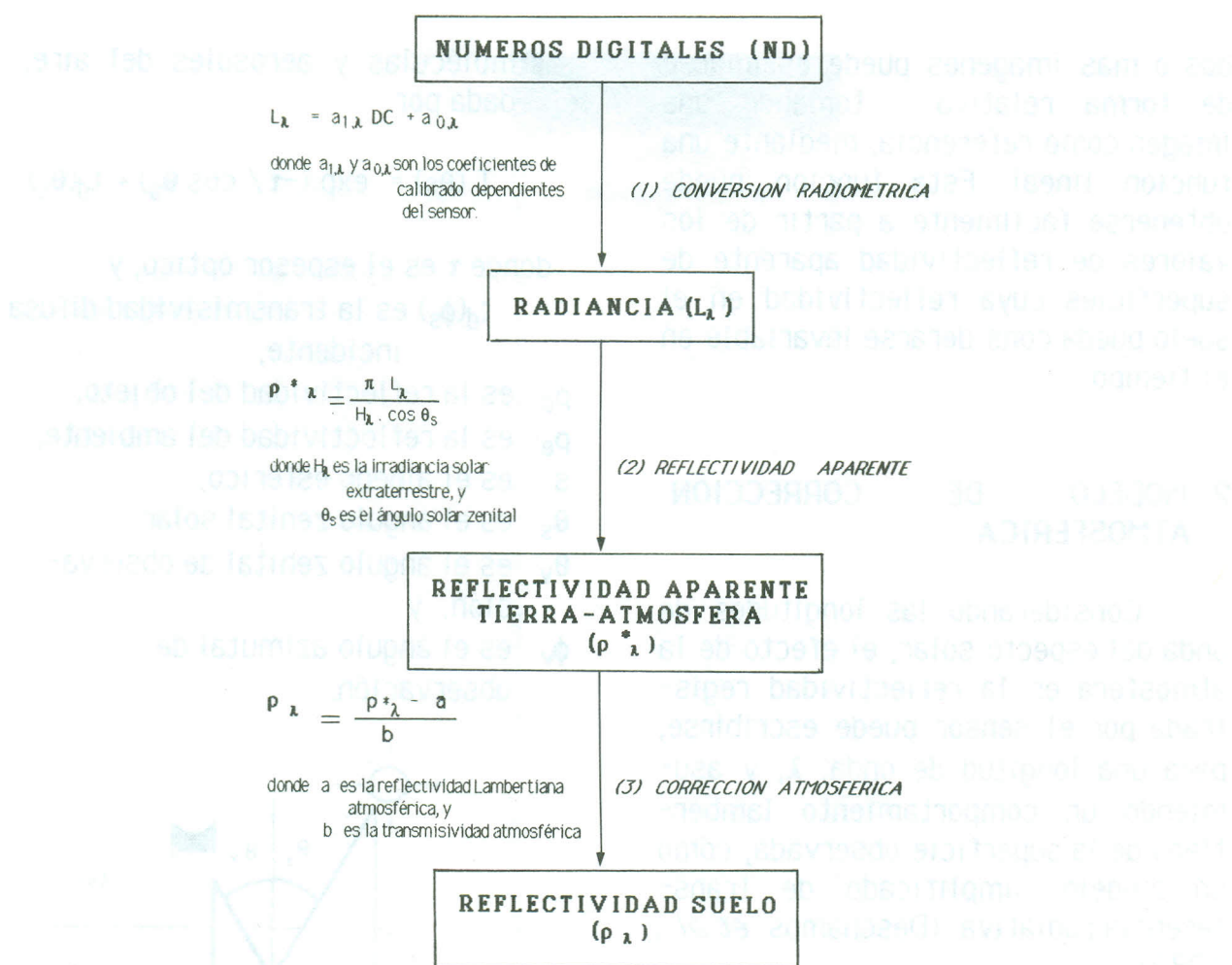


Figura 1.- Esquema del proceso de conversión de los números digitales en valores de reflectividad a nivel del suelo.

existen métodos empíricos para determinar la corrección atmosférica directamente a partir de los datos de la imagen, sin necesidad de utilizar datos de radiosondeo (Alfoldi and Munday, 1978; G. Blanc *et al.*, 1978; Scarpace *et al.*, 1979). Estos modelos asumen la existencia de una atmósfera horizontal homogénea, y una relación lineal entre la reflectividad a nivel del suelo y la energía registrada por el sensor, donde la pendiente nos da la absorción atmosférica y el término independiente la difusión. Sin embar-

go, estos métodos generalmente no están basados en modelos físicos y los resultados obtenidos son menos precisos.

Dentro de esta línea de trabajo, en esta comunicación presentamos una solución alternativa al problema de la corrección atmosférica que, conservando el sentido físico, ofrezca las ventajas de los métodos empíricos en cuanto aplicabilidad. El método propuesto se basa en la idea de que el efecto perturbador de la atmósfera en

dos o más imágenes puede estimarse de forma relativa, tomando una imagen como referencia, mediante una función lineal. Esta función puede obtenerse fácilmente a partir de los valores de reflectividad aparente de superficies cuya reflectividad en el suelo pueda considerarse invariable en el tiempo.

## 2.-MODELO DE CORRECCION ATMOSFERICA

Considerando las longitudes de onda del espectro solar, el efecto de la atmósfera en la reflectividad registrada por el sensor puede escribirse, para una longitud de onda,  $\lambda$ , y asumiendo un comportamiento lambertiano de la superficie observada, como un modelo simplificado de transferencia radiativa (Deschamps *et al.*, 1982):

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_v) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho_e(M) \rangle s} [\rho_c(M) \exp(-\tau / \cos \theta_v) + \langle \rho_e(M) \rangle t_d(\theta_v)] \right\} \quad [1]$$

donde (figura 2):

$\rho^*$  es la reflectividad aparente del sistema suelo-atmósfera,  
 $t_g$  es la trasmisividad gaseosa,  
 $\rho_a$  es la componente atmosférica intrínseca,  
 $T(\theta_s)$  es la transmisividad total de la radiación incidente debida a las

moléculas y aerosoles del aire, dada por

$$T(\theta_s) = \exp(-\tau / \cos \theta_s) + t_d(\theta_s)$$

donde  $\tau$  es el espesor óptico, y

$t_d(\theta_s)$  es la transmisividad difusa incidente,

$\rho_c$  es la reflectividad del objeto,

$\rho_e$  es la reflectividad del ambiente,

$s$  es el albedo esférico,

$\theta_s$  es el ángulo zenital solar,

$\theta_v$  es el ángulo zenital de observación, y

$\phi_v$  es el ángulo azimutal de observación.

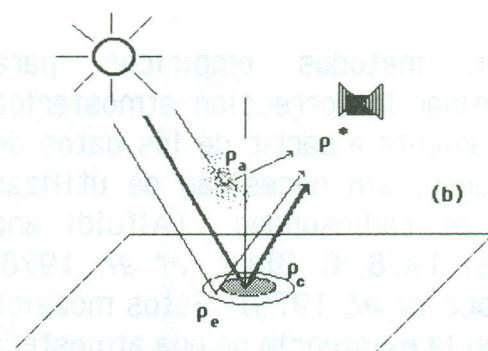
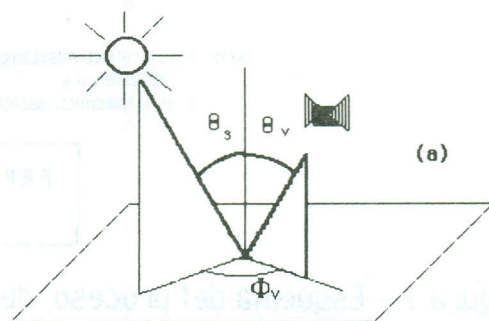


Figura 2.- Esquema del proceso de interacción atmosférica. (a) Geometría de observación. (b) Transferencia radiativa.

Considerando el caso de una superficie homogénea, donde se cumple que  $\rho_c = \rho_e = \rho$ , la ecuación [1] puede escribirse de la forma

$$\rho^* = t_g \left[ \rho_a + \frac{T(\theta_s) \rho}{1 - \rho_s} T(\theta_v) \right] \quad [2]$$

donde  $T(\theta_v)$  es la transmisividad total para la radiación emergente, dada por

$$T(\theta_v) = \exp(-\tau / \cos \theta_v) + t_d(\theta_v)$$

y, puesto que  $t_g \approx 1 - \rho_s$  (Deschamps *et al.*, 1983), la ecuación [2] puede escribirse en la forma

$$\rho^* = a + b \rho \quad [3]$$

$$\begin{aligned} \text{siendo } a &= t_g \rho_a \\ b &= T(\theta_s) T(\theta_v) \end{aligned}$$

De esta forma, puede decirse que para superficies cuya reflectividad en el suelo pueda considerarse constante, es posible determinar la relación existente entre la reflectividad aparente obtenida para esta superficie en dos imágenes de diferentes fechas,  $\rho_1^*$  y  $\rho_2^*$ , y estimar de este modo la corrección atmosférica relativa existente entre ambas imágenes. Así, escribiendo la ecuación [3] para dos fechas diferentes, resulta que la relación entre  $\rho_1^*$  y  $\rho_2^*$  tiene una forma lineal

$$\rho_1^* = a \rho_2^* + b \quad [4]$$

$$\text{donde } a = T_1 / T_2$$

$$b = t_{g1} \rho_{a1} - t_{g2} \rho_{a2} (T_1 / T_2)$$

Los coeficientes de la ecuación [4] pueden determinarse si es posible identificar en la imagen al menos dos puntos de reflectividad constante.

Por otra parte, este método de corrección tiene la ventaja adicional de corregir, además de los efectos causados por la capa atmosférica, cualquier otro factor perturbador (ruido, desajustes del sensor, pérdida de sensibilidad...) que pudiera afectar a la imagen, ya que estos efectos se suman al término independiente,  $b$ , de la ecuación [4].

### 3.- RESULTADOS

El método descrito ha sido aplicado a una subescena de 256 x 256 pixels de las imágenes Landsat 5 Thematic Mapper (TM) de 22 Julio y 20 Noviembre de 1985. Esta escena corresponde a L'Albufera de Valencia, de casi 8 km de diámetro, situada en la costa Mediterránea oriental 10 km al sur de la ciudad de Valencia, cuyas aguas, debido al elevado grado de eutrofización, han sido objeto de anteriores estudios mediante técnicas de teledetección (Caselles, *et al.*, 1987; López García y Caselles, 1987).

Con objeto de determinar las rectas de corrección (ecuación 4), partimos de la hipótesis de considerar superficies de reflectividad constante: la arena seca, el asfalto y el agua

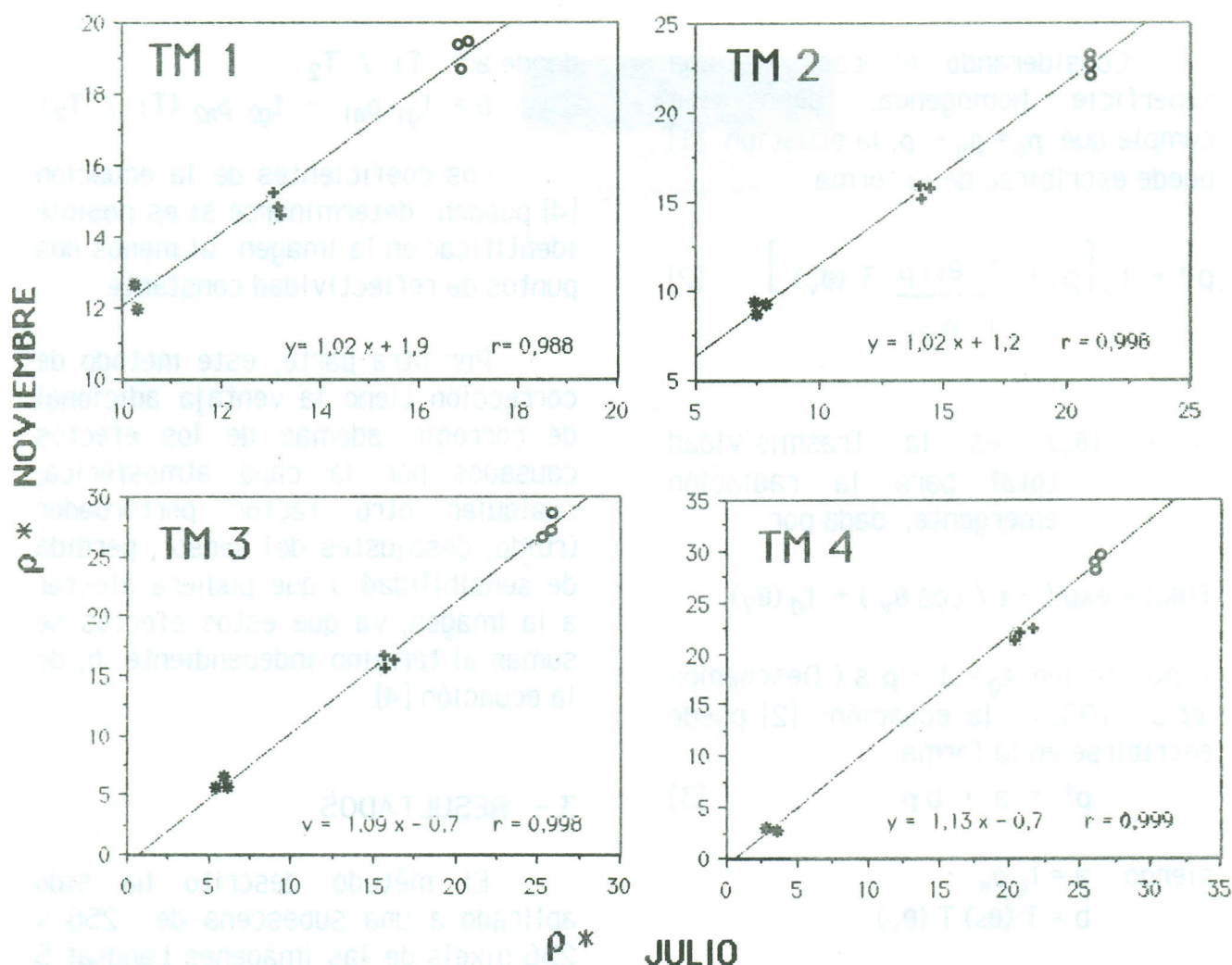


Figura 3.- Ecuaciones de corrección obtenidas mediante el método propuesto para las bandas 1-4 del Landsat 5 (Thematic Mapper). Se representan los valores de reflectividad aparente de Noviembre *versus* Julio, para tres superficies: arena (\*), asfalto (+) y agua del mar (\*).

limpia. Estas superficies debían cumplir la doble condición de ser fácilmente identificables en la subescena de estudio o en zonas próximas a ella, y de cubrir ampliamente el rango de reflectividades entre los cuales se incluyen todos los valores de la imagen. Los valores de reflectividad aparente de la arena se obtuvieron en el cordón dunar litoral que bordea a la albufera; los valores

de asfalto fueron tomados en un tramo de la autopista Valencia-Alicante que cruza la zona; y los datos de agua corresponden a los valores medidos en una zona alejada de la costa aproximadamente 6 km para evitar la turbidez litoral de las aguas. En todos estos casos se consideraron valores medios representativos.

A partir de estos datos se han obtenido las ecuaciones correctoras para las bandas 1-4 del Thematic Mapper (figura 3), que muestran el carácter lineal de la corrección atmosférica relativa. Tal y como podía esperarse, se observa que la importancia de la corrección es superior en el intervalo espectral correspondiente a la banda 1, y mucho menor en las bandas 3 y 4.

El resultado de aplicar estas ecuaciones al conjunto de la imagen será una nueva imagen corregida y comparable a la imagen tomada como referencia. La figura 4 muestra un ejemplo de aplicación para la banda 1 del Thematic Mapper donde se han representado la imágenes de Julio en valores de reflectividad aparente,  $p_1^*$  (4a) Noviembre,  $p_2^*$  (4b), y la imagen de Noviembre corregida, según las ecuaciones obtenidas dadas en la figura 3, respecto a la imagen de Julio (4c). Las diferencias entre las imágenes 4a y 4b ponen de manifiesto la necesidad de realizar la corrección en estudios multitemporales, puesto que si trabajamos sin corrección atmosférica no es posible determinar si las diferencias entre las imágenes de julio y noviembre se deben a variaciones de la calidad de agua, o son debidas a variaciones en las condiciones de la atmósfera. Después de realizar la corrección atmosférica, las imágenes 4a y 4c son comparables, y puede pensarse que las diferencias observadas son debidas a cambios en

la calidad de las aguas, y no a la atenuación atmosférica.

De cara a comprobar la validez del método propuesto, hemos comparado estos resultados con los que obtendríamos de aplicar un modelo de corrección atmosférica clásico, de los que utilizan datos atmosféricos. Para ello hemos utilizado el modelo de Tanré *et al.* (1986) *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)* para calcular los valores  $T$ ,  $t_g$  y  $p_a$  (bandas 1-4 TM) para las fechas de 22 de Julio y 20 Noviembre de 1985, que son necesarios para obtener los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación [4].

La Tabla 1 nos permite realizar la comparación entre ambos métodos. Tomando los valores medios de reflectividad aparente de noviembre correspondientes a la superficie del agua de la L'Albufera en las bandas 1-4, hemos corregido estas imágenes de acuerdo con estas ecuaciones (columna 3), y también según las ecuaciones que se obtuvieron con nuestro método (columna 2). Puede observarse que las diferencias existentes entre ambas columnas son inferiores al 2,5 % con la excepción de la banda 2, la cual muestra diferencias del orden del 10 %. En la figura 4, se representa también la imagen de Noviembre corregida mediante el modelo de Tanré *et al.* (1986) (4d), la cual no presenta diferencias significativas respecto a la imagen 4c.

**TABLA 1.-**  
**Aplicación del método de corrección a la imagen de noviembre**

| Thematic Mapper<br>bandas | $\rho^*$ Nov. | $\rho^*$ Nov.<br>corregida (1) | $\rho^*$ Nov.<br>corregida (2) |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1                         | 12.2          | 10.2                           | 10.1                           |
| 2                         | 10.9          | 9.4                            | 10.5                           |
| 3                         | 8.4           | 8.3                            | 8.1                            |
| 4                         | 8.4           | 8.1                            | 8.2                            |

(1) Valores corregidos según las ecuaciones obtenidas por el método propuesto.

(2) Valores corregidos según las ecuaciones obtenidas por el Programa (5S) de Tanré *et al.*, (1986)

De todo esto podemos concluir que los resultados obtenidos por ambos métodos son bastante próximos y, en consecuencia, el método propuesto puede ser tan útil como los modelos atmosféricos tradicionales, presentando la ventaja de su mayor simplicidad.

#### 4.- CONCLUSIONES

El método de corrección alternativo presentado aquí, parte de dos hipótesis: (1) la corrección atmosférica puede expresarse en términos de reflectividad como una función lineal y, (2) los efectos atmosféricos pueden considerarse constantes sobre toda la zona de estudio.

La única condición necesaria para asegurar la aplicación del método es la identificación dentro de la imagen de estudio de al menos 2

puntos cuya reflectividad en el suelo pueda ser considerada invariable a lo largo del año. Como contrapartida, este método no requiere la existencia de datos de perfiles atmosféricos, ni de medidas realizadas *in situ*, y ofrece las ventajas de los métodos de corrección empíricos.

Aunque este método no estima la corrección atmosférica en términos absolutos, es de gran utilidad en estudios multitemporales tales como el ejemplo presentado aquí, ya que permite corregir, dos a dos, un gran número de imágenes tan sólo con tomar una de ellas como referencia. De la misma forma, si pueden identificarse superficies de reflectividad constante en diferentes escenas, será posible determinar la corrección atmosférica relativa entre imágenes correspondientes a distintos lugares.

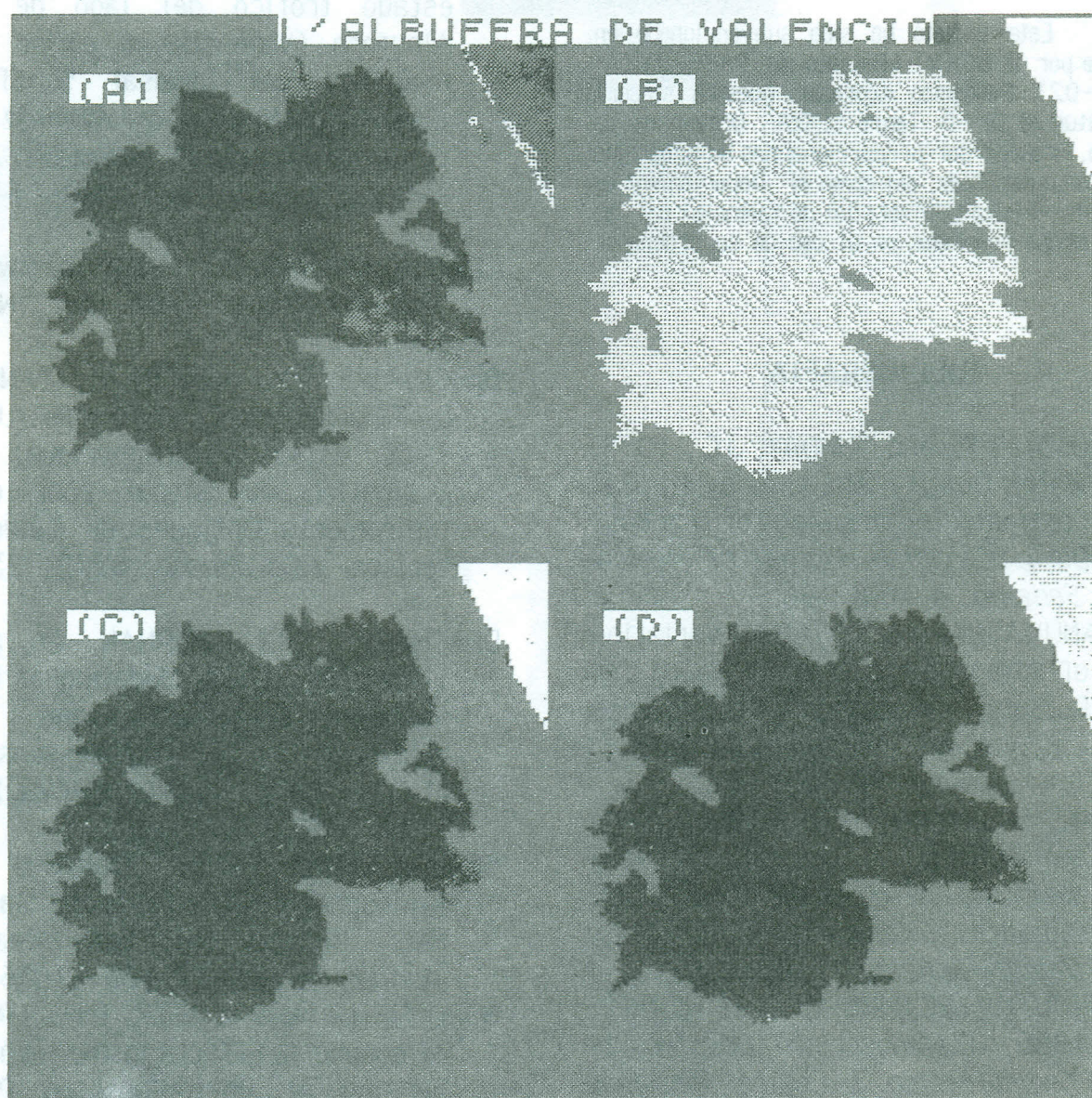


Figure 4.- Imagen correspondiente a la banda 1 del Landsat 5 Thematic Mapper.

(sóamente se han contrastado los valores correspondientes a la superficie del lago.

(a) Reflectividad aparente de Julio ( $p^*$ ).

(b) Reflectividad aparente de Noviembre ( $p^*$ ).

(c) Imagen de Noviembre ( $p^*$ ) con corrección atmosférica según el método propuesto.

(d) Imagen de Noviembre ( $p^*$ ) con corrección atmosférica según el Programa 5S (Tanré *et al.*, 1986).

Ver Foto color n.º 17 en página 368

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado en parte por la DGICYT (Proyecto No. PA86-0177-C02-02). Deseamos expresar nuestra sincera gratitud al Dr. D. Tanré (L.O.A., Université de Lille, France) por proporcionarnos su programa SS Computer Code, así como al Departament de Química-Física (Universitat de València) por las facilidades prestadas en el uso de su ordenador VAX.

## BIBLIOGRAFIA

- ALFOLDI, T.T., and MUNDAY, J.C., 1978, Water Quality Analysis by Digital Chromaticity Mapping of Landsat Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 4, 108-126.
- ARANUVACHAPUN, S., 1983, Variation of Atmospheric Optical Depth for Remote Sensing Radiance Calculations. *Remote Sensing of Environment*, 13, 131-147.
- ARANUVACHAPUN, S., 1986, The atmospheric optical depth spectrum determined from CZCS radiance. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 105-118.
- BARIOU, R., LECAMUS, D. et LE HENAFF, 1985, L'Atmosphère. *Dossiers de Télédétection* 3, Centre Régional de Télédétection, Université de Rennes-Haute Bretagne.
- BLANC, G., FONTANEL, A., LALLEMAND, C. and WADSWORTH, A., 1978, Corrections Radiométriques des Enregistrements Landsat en vue d'une Comparaison de Chrono-séquences. *Revue de Photo-interprétation*, 78-5/5.
- CASELLES, V., LOPEZ GARCIA, M.J. y SORIA, J.M., 1987, Estudio del estado trófico del lago de la Albufera (Valencia) a partir de imágenes del Landsat 5 (TM). *Comunicaciones de la I Reunión del Grupo de Trabajo de Teledetección, Barcelona 10-11 dic. 1986*, 141-156.
- CHANDRASEKHAR, S., 1950. *Radiative Transfer*. Dover Publ. Inc., New York.
- DESCHAMPS, P.Y., HERNAN, M., TANRE, D., ROUQUET, M.C., DURPAIRE, J.P., 1982, Effets Atmosphériques et Evaluation du Signal pour des Instruments Optiques de Télédétection. *ESA Journal*, 82/2, 233-246.
- DESCHAMPS, P.Y., HERNAN, M. and TANRE, D., 1983, Modeling of the atmospheric effects and its application to the remote sensing of ocean color. *Applied Optics*, 23, 3751-3758.
- GORDON, H.R., 1978, Removal of Atmospheric Effects from Satellite Imagery of the Oceans. *Applied Optics*, 17, 1631-1636.
- GORDON, H.R. and CLARCK, D.K., 1980, Atmospheric Effects in the Remote Sensing of Phytoplankton Pigments. *Boundary Layer Meteorology*, 18, 299-313.
- KHOSRAVIANI, G. and CRACKNELL, A.P., 1984, Atmospheric Effects in Multiple-look Observations from Space. *18th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM, CNES, Paris*.
- KNEIZYS, F.X., SHETTLE, E.P., GALLERY, W.O., CHETWYND, J.H., ABREU, L.W.,

- SELBY, J.E.A., FENN, R.W. and McCLATCHEY, R.A., 1980, Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 5, *Environmental Research Papers*, 697, Air Force Geophysics Laboratory, Massachusetts Air Force Systems Command, USA.
- LAMBECK, P.F., KAUTH, R. and THOMAS, G.S., 1978, Data Screening and Preprocessing for Landsat MSS Data. *Proceedings of the 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan*, 999-1008.
- LOPEZ GARCIA, M.J. and V. CASELLES, 1987, Use of Thematic Mapper Data to Assess Water Quality in Albufera Lagoon of Valencia (Spain). *Advances in Digital Image Processing Proceedings of the 13th Annual Conference of the Remote Sensing Society, University of Nottingham, 7-11 september 1987*, 510-519.
- PRICE, J.C., 1987, Calibration of Satellite Radiometers and the Comparison of Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 21, 15-27.
- ROBINOVE, Ch. J., 1982, Computation with Physical Values from Landsat Digital Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48, 781-784.
- ROLLIN, E.M., STEVEN, M.D. and P.M. MATHER, 1985, *Atmospheric Corrections for Remote Sensing*. Proceedings of a Remote Sensing Workshop, Department of Geography, University of Nottingham.
- SCARPACE, F.L., HOLMQUIST, K.W. and FISHER, L.T., 1979, Landsat Analysis of Lake Quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45, 623-633.
- STEVEN, M.D., MONCRIEFF, J.B. and MATHER, P.M., 1984, Atmospheric Attenuation and Scattering determined from Multiheight Multispectral Scanner Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 733-747.
- STEVEN, M.D. and ROLLIN, E.M., 1986, Estimation of Atmospheric Corrections from Multiple Aircraft Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 481-497.
- SUN YI -YI, and MINNETT, P.J., 1982, A Method of Correcting the Atmospheric Effects in Satellite Measurements of Ocean Color. *Remote Sensing and the Atmosphere, Proceedings of the Annual Technical Conference held in Liverpool*, 110-116.
- TANRE, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J.J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P.Y., 1986, *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*. Laboratoire d'Optique Atmosphérique Université des Sciences et Techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Asq, France.
- TURNER, R.E. and SPENCER, M.M., 1972, Atmospheric Model for Correction of Spacecraft Data. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Vol. 2*, 895-934.