

SOBRE LA UTILIZACION DE DERIVADAS EN EL ANALISIS DE DATOS DE ALTA RESOLUCION ESPECTRAL

M.A. Gilabert Navarro, M.T. Younis, J. García-Haro y J. Meliá Miralles
Departament de Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València
Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (València)
Tel. 96-3864350, Fax. 96-3642345, E-mail: M.Amparo.Gilabert@uv.es

RESUMEN.- La derivada de los espectros de reflectividad puede ser considerada como una metodología complementaria a las utilizadas tradicionalmente para estudiar los datos de alta resolución espectral. En concreto, algunos índices espectrales que se obtienen de estas curvas presentan una considerable correlación con las principales propiedades de las superficies naturales estudiadas. Para el caso de cubiertas vegetales, la longitud de onda del denominado límite rojo así como la amplitud del mismo presentan, en ocasiones, claras ventajas sobre los índices de vegetación tradicionales al correlacionar mejor con el índice de superficie foliar con independencia de las propiedades ópticas del suelo. Por otra parte, la segunda derivada de los espectros de algunas rocas permite cuantificar mejor la intensidad de sus rasgos de absorción, muy correlacionada con el contenido mineralógico de las mismas.

ABSTRACT.- In this work, the first and second derivatives of reflectance spectra with respect to wavelength are recorded to obtain spectral indices that are well correlated with natural surface features such as biophysical properties and mineral content. In the first case, the first derivative let us easily identify the red edge wavelength which is highly correlated with the chlorophyll content of a vegetation canopy and therefore it is also indirectly correlated with its leaf area index, being less affected by soil spectral properties than traditional vegetation indices. On the other hand, in geological applications, the second derivative spectra, which can be considered as independent of the brightness of the original reflectance spectra, show highly enhanced the absorption features that can be quantified to be correlated with the mineralogical content of the studied rocks.

1.- INTRODUCCION

La reflectividad R de una superficie es básicamente una función del espacio x , tiempo t , longitud de onda l y geometría de observación e iluminación q :

$$R = R(x, t, l, q)$$

La dependencia con x nos permite conocer la distribución espacial de los elementos en la escena (producir mapas); la dependencia temporal facilita la detección de eventos (evolución dinámica de los objetos) y la dependencia con la longitud de onda permite el reconocimiento de materiales: el contraste espectral y la presencia de determinados rasgos de absorción sirve para identificar la naturaleza o composición del sistema en estudio. Finalmente, la anisotropía de la radiación está relacionada con las propiedades ópticas y estructura de la superficie (posibilidad ésta menos explotada en teledetección, pero muy prometedora).

En este trabajo centraremos nuestra atención en el estudio de la reflectividad de diversas superficies naturales en función de la longitud de onda: $R=R(l)$. La resolución espectral de los datos convencionales de teledetección, con anchura de banda de ≈ 100 nm, presenta limitaciones cuando el espectro de reflectividad del material de interés muestra cambios no

graduales o rasgos característicos muy finos en determinadas longitudes de onda. En este contexto, puede ser de gran interés la utilización de datos de alta resolución espectral (bandas de algunos nanómetros de anchura), que permiten identificar y resolver rasgos más finos en los espectros. Tal sería el caso, por ejemplo, de las medidas realizadas con espectrorradiómetros a nivel de suelo o las procedentes de imágenes del AVIRIS. La riqueza espectral de estos datos puede explotarse al máximo recurriendo a técnicas propias de espectroscopía, ampliamente utilizadas, por otra parte, en otros campos de investigación como es el caso de la química analítica o la ciencia de materiales. Una de estas técnicas consiste en analizar las derivadas sucesivas de los espectros en función de la longitud de onda (O'Haver, 1979), dado que permiten reconocer mejor algunos rasgos de los mismos (con independencia del "brightness" del espectro) así como resolver solapamientos de características espectrales. Ciertamente esto es así porque la primera derivada muestra máximos donde en el espectro original aparecían puntos de inflexión y la segunda derivada los muestra donde inicialmente se producía un rasgo de absorción, esto es, un mínimo de reflectividad.

En este trabajo se presentan algunos ejemplos de la aplicación de las derivadas primera y segunda en el análisis de los espectros de reflectividad (de 400 a 2500 nm) de distintas superficies naturales (con y sin cubierta vegetal), obtenidos con el espectrorradiómetro GER SIRIS en varias experiencias de campo y de laboratorio.

En concreto, para el caso de la vegetación, estudiaremos la 1ª derivada de los espectros, que permite identificar la longitud de onda del denominado límite rojo y calcular algunas magnitudes asociadas al mismo. Recordemos que el límite rojo (Horler et al., 1983) es la zona de transición en la curva de reflectividad de la vegetación entre el mínimo en el rojo, asociado a la absorción por clorofila, y el máximo en el infrarrojo cercano (originado por la dispersión de la radiación por el interior de la estructura celular de las hojas) (entre 650 y 800 nm). Entre ambas regiones espectrales existe, por lo tanto, un punto de inflexión que, en el espectro correspondiente a la primera derivada, aparece como un máximo. En este contexto, se presentarán algunos resultados de una experiencia llevada a cabo mediante radiometría de campo para estudiar la evolución fenológica del maíz (Gilabert et al., 1996a, 1996b), así como los resultados de otra experiencia desarrollada en condiciones de laboratorio (García Haro, 1994) para analizar la influencia de las propiedades ópticas del suelo en la reflectividad de una cubierta vegetal.

Dentro de las aplicaciones en Geología, hay que recordar que el principal factor que determina la signatura espectral de los materiales geológicos es su composición mineralógica, que da lugar a rasgos de absorción característicos, situados en determinadas longitudes de onda, que se corresponden con la energía de las transiciones -electrónicas, rotacionales y vibracionales- que se producen en la estructura del cristal (Vane and Goetz, 1988). Además de los rasgos de absorción (mínimos de reflectividad), los espectros de rocas pueden presentar una reflectividad mayor o menor en todo el espectro como consecuencia de su contenido en cuarzo o en materia orgánica, respectivamente. Reflectividad que puede sufrir, además, ciertas modificaciones debidas a factores externos tales como las condiciones de iluminación. En este contexto veremos que la segunda derivada de los espectros permite, además de facilitar el reconocimiento de los rasgos de absorción (aparecen como máximos en la segunda derivada), normalizar la influencia de algunos factores externos que alteran el albedo de todo el espectro.

2.- METODOLOGIA

Todos los valores de reflectividad que se discutirán a continuación se han obtenido mediante

un espectrorradiómetro SIRIS (GER), con un campo de observación de 14°x4° y una resolución espectral de 2-4 nm, dependiendo de la longitud de onda. Este instrumento permite determinar el factor de reflectividad bidireccional de las superficies en estudio entre 400 y 2500 nm al normalizar la radiancia de las mismas con respecto a la de una superficie ideal de referencia. En este caso, el blanco de referencia utilizado ha sido un Spectralon (Labsphere).

El montaje experimental utilizado en cada caso depende de la superficie en estudio y de las condiciones bajo las cuales se realizaron las medidas (campo o laboratorio). Se pueden encontrar detalles adicionales en García-Haro (1994), Gilabert et al. (1996a, 1996b) y Younis (1993). En cualquier caso, la observación siempre es vertical, situando el cabezal óptico del sensor a una distancia de, al menos, 1 m sobre la superficie, en medidas de campo, y de 0.75m en medidas efectuadas en laboratorio. Sobre cada superficie se realiza un barrido compuesto por un número de medidas que depende de su heterogeneidad espacial para obtener un espectro promedio que sea estadísticamente representativo de la misma.

Posteriormente se determinan las derivadas sucesivas de dichos espectros ($\delta R/\delta l$, $\delta^2 R/\delta l^2$) habiéndoles aplicado previamente un suavizado para eliminar el ruido de fondo presente en los datos experimentales. En ocasiones se aplicarán también filtros que reproducen la respuesta espectral relativa de las bandas de medida del sensor Thematic Mapper, al objeto de analizar las posibles ventajas o desventajas de los datos de alta resolución espectral frente a los convencionales de baja resolución espectral.

3.- RESULTADOS

3.1.- Aplicaciones Agronómicas

En este apartado se analiza la primera derivada de los espectros, que permite identificar fácilmente el punto de inflexión o límite rojo (*red edge*) en los espectros de cubiertas vegetales entre 600 y 800 nm y cuantificar algunos parámetros relacionados con el mismo, tales como su longitud de onda, para la que se obtiene un máximo en la primera derivada, y la amplitud de la curva en dicho punto. Se incorporan además datos de baja resolución espectral relativos al índice de vegetación tradicional (NDVI), obtenido a partir de la diferencia normalizada de la reflectividad en las bandas TM4 (infrarrojo cercano) y TM3 (rojo), al objeto de comparar, como se ha mencionado anteriormente, las posibles ventajas y desventajas de los índices derivados de los datos de alta resolución espectral frente a los índices de vegetación tradicionales.

A continuación se presentan los resultados de dos experiencias distintas: una de radiometría de campo, diseñada para estudiar la evolución fenológica del cultivo de maíz a través de correlaciones entre parámetros espectrales y biofísicos (LAI y biomasa), y otra de laboratorio, cuya finalidad era estudiar la perturbación que introduce en la señal de una cubierta vegetal el color del suelo.

Evolución fenológica del maíz

En la figura 1 se han representado entre 600 y 800 nm los espectros medios de cada una de las fechas de medida. Se observa cómo a medida que avanza el ciclo fenológico la absorción por clorofila es mayor, produciendo un decrecimiento gradual en la zona del rojo. Así mismo, a medida que aumentan las capas de hojas, la dispersión de la radiación en el infrarrojo próximo aumenta ocasionando una reflectividad más alta en esta zona.

A partir de mediados o finales de Agosto el efecto que se produce es el contrario como

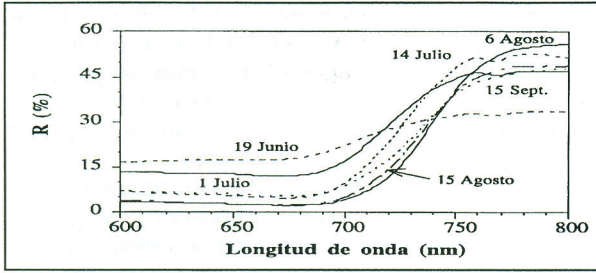


Figura 1.- Espectros de reflectividad entre 600 y 800 nm del cultivo del maíz a lo largo de su evolución fenológica.

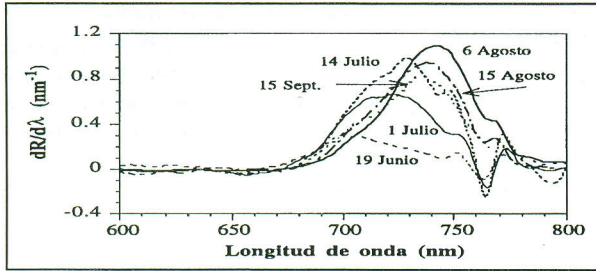


Figura 2.- Espectros de la primera derivada de la reflectividad entre 600 y 800 nm del cultivo del maíz.

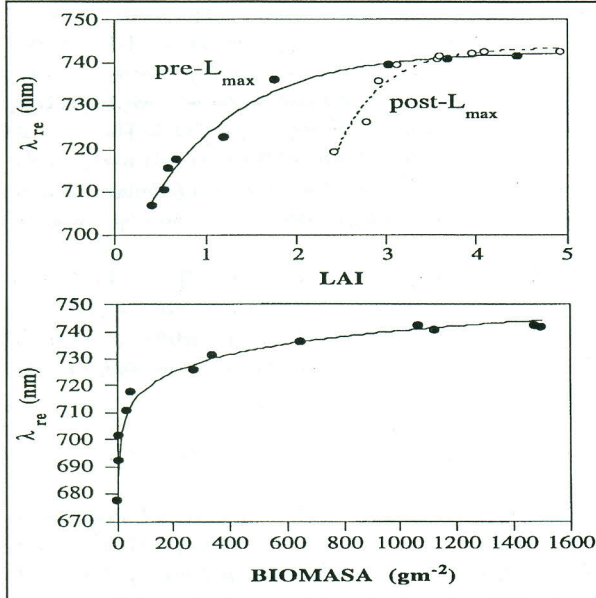


Figura 3.- Valores de la longitud de onda del límite rojo (λ_{re}) en función del LAI y de la biomasa.

consecuencia de la senescencia del cultivo.

En la figura 2 se representan las curvas correspondientes a la primera derivada de los espectros anteriores, en la misma región espectral, observándose el máximo correspondiente al límite rojo (red edge). Se aprecia cómo este máximo se desplaza hacia longitudes de onda mayores en la etapa de crecimiento del cultivo, mientras que sufre un corrimiento hacia el azul en la senescencia. A partir de estas curvas se determinó su longitud de onda λ_{re} , es decir, la longitud de onda correspondiente al punto de inflexión entre el rojo y el infrarrojo próximo o, lo que es lo mismo, la longitud de onda del máximo en la curva correspondiente a la primera derivada. Las correlaciones

entre la longitud de onda del límite rojo, λ_{re} , y el LAI y la biomasa se representan en la figura 3. En estudios previos (Gilbert et al., 1996a, 1996b) utilizando sólo datos de baja resolución espectral, los coeficientes de determinación (r^2) que se obtuvieron entre NDVI y LAI y biomasa fueron iguales o superiores a 0.96. Analicemos ahora qué ocurre con datos de alta resolución espectral.

En la representación de λ_{re} con respecto al LAI, al igual que ocurría con el NDVI (Gilbert et al., 1996a, 1996b), se observa un *plateau*, pero esta saturación temporal, que desaparece con el subsiguiente desplazamiento hacia el azul del límite rojo, permanece durante

un periodo más largo que para el NDVI: la I_{re} parece presentar una mayor inercia a recuperar los valores anteriores al LAI máximo. Por este motivo, la histéresis que se observaba para el NDVI es menos evidente en este caso. Este comportamiento asintótico, típico en esta clase de estudios, se puede modelizar ajustando las curvas a funciones exponenciales. El ajuste se realiza para cada una de las partes del ciclo fenológico. En la segunda rama del ciclo, el coeficiente de determinación del ajuste es ligeramente inferior al que se encontró para el NDVI (0.94 frente a 0.96).

En la segunda gráfica de la figura 3 sólo se incorporan los valores hasta que el límite rojo alcanza el máximo, dado que la biomasa continúa aumentando hasta permanecer prácticamente constante hacia el final del ciclo fenológico. El mejor modelo de ajuste ha resultado ser el logarítmico. El comportamiento del límite rojo con la biomasa es similar al que presentaba el NDVI (Gilbert et al., 1996a, 1996b), sin embargo, y dado que la I_{re} alcanzaba su máximo aproximadamente una semana más tarde que el índice, se puede incluir un periodo más largo en el ajuste logarítmico (con coeficiente de determinación ligeramente superior en este caso: 0.98 frente a 0.96). Se podría concluir de esta primera experiencia que aunque el límite rojo no parece presentar ventajas significativas respecto al NDVI cuando se estudian correlaciones con el LAI, parece más útil que el índice cuando se estudia la biomasa, dado que la fenología del cultivo se puede caracterizar durante un periodo de tiempo más largo.

Normalización de las propiedades ópticas del suelo

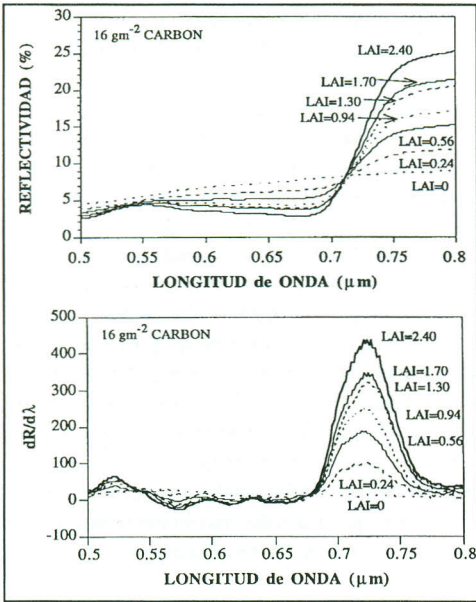


Figura 4.- Experiencia de laboratorio: espectros de la reflectividad y de la primera derivada correspondientes a plots con un suelo dado (recubrimiento de carbón de 16 gm⁻²) y de los distintos valores de LAI distintos

derivadas de los mencionados espectros. En este caso se observa cómo la amplitud de la onda aumenta a medida que lo hace el LAI, mientras que la longitud de onda de éste máximo sólo

Vamos a considerar otra experiencia realizada en laboratorio sobre distintos plots con *Quercus ilex*, en los que se variaba tanto la cantidad de vegetación (LAI) como las propiedades ópticas del suelo, en concreto, su color (mediante distintos niveles de recubrimiento del sustrato original -arcillas rojas- con carbón). Detalles adicionales de esta experiencia se pueden encontrar en García-Haro et al. (1994, 1996a, 1996b). Nuevamente vamos a comparar los resultados obtenidos con los parámetros derivados de la primera derivada del espectro y los obtenidos por el método tradicional (NDVI). En la figura 4 mostramos, para uno de los tipos de suelo (con recubrimiento de carbón de 16 gm⁻²), la reflectividad de los plots (las distintas tramas se corresponden con valores de LAI distintos). Se observa una disminución progresiva de la reflectividad en el rojo (aumento concentración clorofila) y un aumento en el infrarrojo próximo. Es de esperar, por tanto, que el NDVI aumente también a medida que aumenta el LAI. En la gráfica inferior se muestran las primeras derivadas de los mencionados espectros. En este caso se observa cómo la amplitud de la onda aumenta a medida que lo hace el LAI, mientras que la longitud de onda de éste máximo sólo

sufre variaciones ligeras.

Los parámetros asociados al límite rojo estudiados en este ejemplo son: (i) la amplitud de la onda de la derivada (altura de la curva) y (ii) el área encerrada por la misma entre 680 y 780 nm (Filella and Peñuelas, 1994).

Pasemos a continuación a analizar los resultados obtenidos comparándolos con el comportamiento del NDVI (figura 5).

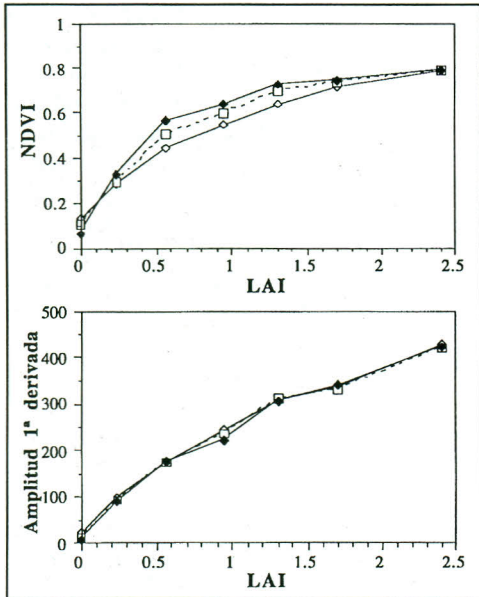


Figura 5.- NDVI y amplitud de la primera derivada en la zona del límite rojo en función del LAI para cubiertas vegetales similares sobre suelos de color distinto

En primer lugar representamos los valores de NDVI con respecto al LAI para todos los plots (las distintas tramas se corresponden con sustratos de color distinto, es decir, con distinto recubrimiento por carbón). Se observa, como era de esperar, que el índice aumenta monótonamente con la cantidad de vegetación, con un tramo inicial hasta $LAI \approx 1.5$, a partir del cual se satura la señal. Lo más destacable en esta figura es la dependencia del NDVI con las propiedades ópticas del suelo, dependencia que es mayor para valores intermedios de LAI, como cabía esperar, lo cual pone de manifiesto, por otra parte, la limitación de este índice en estudios relacionados con zonas que presentan vegetación dispersa. Por el contrario, cuando se representan, en función del LAI, los dos parámetros deducidos de la primera derivada del espectro (es decir, la amplitud de la derivada y el área encerrada por la misma entre 680 y 780 nm) se observa que ambos presentan una mayor linealidad que el

NDVI, no saturándose todavía las señales dentro del intervalo de valores de LAI con el que hemos trabajado. Por otro lado, dichos parámetros presentan la ventaja sobre el NDVI de ser menos sensibles al color del sustrato de fondo, es decir, permiten determinar, a partir de datos espectrales de alta resolución, la cantidad de vegetación presente en la escena con independencia del color del suelo de fondo. Por lo tanto, en principio, son éstas unas magnitudes espectrales que normalizan mejor que los índices tradicionales las perturbaciones introducidas por las propiedades ópticas del fondo. Dado que estos dos parámetros mostraban en este caso un comportamiento similar, en la figura 5 sólo se ha representado la amplitud de la primera derivada.

3.2.- Aplicaciones en Geología

A continuación vamos a pasar a comentar brevemente la utilidad de la técnica para identificar rasgos de absorción en distintos materiales litológicos y cuantificar la intensidad de los mismos, que está determinada por su composición mineralógica.

Como se ha comentado anteriormente la segunda derivada produce máximos en las longitudes de onda donde aparecían rasgos de absorción en el espectro de reflectividad, siendo la

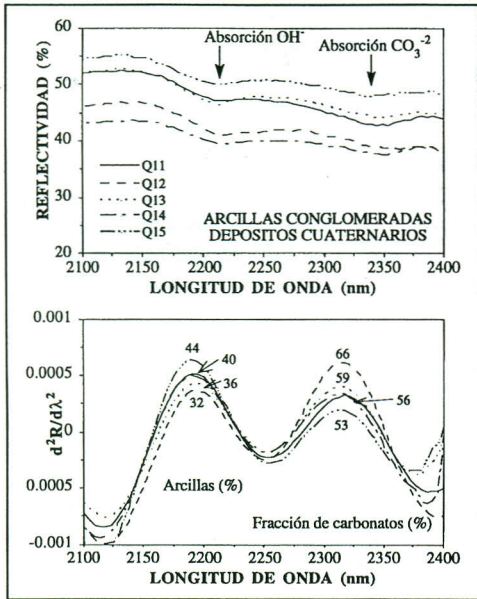


Figura 6.- Espectros de reflectividad y de la segunda derivada, en la zona del infrarrojo medio, correspondientes a distintas muestras de arcillas conglomeradas

En dichos espectros se aprecian los rasgos de absorción citados anteriormente (alrededor de 2200 nm y 2340-2350 nm, respectivamente). En la gráfica inferior de la figura 6 se representa la segunda derivada de los espectros de reflectividad en el mismo intervalo de longitudes de onda. Además de realzar notablemente los rasgos de absorción (que ahora aparecen como máximos), estas curvas resultan ser independientes del "brightness" de los espectros originales (que venían afectados por factores externos a las rocas además de a su propia composición mineralógica), de forma que los espectros correspondientes a la segunda derivada aparecen "ordenados" en función del contenido mineralógico, existiendo una correlación significativa entre la intensidad del rasgo de absorción (que viene dada por la amplitud de la onda en la segunda derivada) y los análisis mineralógicos.

4.- CONCLUSIONES

Acerca del interés de calcular las derivadas de los espectros de reflectividad de distintas superficies naturales, los ejemplos con que se ha ilustrado esta comunicación permiten poner de manifiesto tanto su utilidad en aplicaciones agronómicas como en aplicaciones geológicas. En el primer caso, la primera derivada facilita la detección del límite rojo así como la definición de distintos parámetros relacionados con el mismo, habiéndose encontrado que:

- la longitud de onda del límite rojo parece correlacionarse mejor con la cantidad de vegetación cuando se estudian cubiertas vegetales que presentan un fondo idéntico pero una vegetación que evoluciona a lo largo de su ciclo fenológico,
- la amplitud de la onda en dicho punto (y el área encerrada por dicha curva) se correlacionan mejor con el LAI cuando estudiamos un mismo tipo de cubierta vegetal (toda la vegetación en la misma etapa del ciclo fenológico) pero sobre suelos de propiedades ópticas distintas. En el último caso, las correlaciones con el LAI se alcanzan con

amplitud de la onda de la segunda derivada proporcional a la intensidad de dichos rasgos. Vamos a ilustrar esta característica con datos procedentes de una experiencia de radiometría de campo cuyo principal objetivo era el de caracterizar radiométricamente las litologías de una zona semiárida (Cuenca del Guadalentín), correlacionando su contenido mineralógico (obtenido por Rayos X) con la intensidad de los rasgos de absorción presentes en los espectros de reflectividad: fundamentalmente debidos a la presencia de óxidos de hierro (en el visible) y a arcillas (OH⁻) y carbonatos (calcita y/o dolomita) en el infrarrojo medio. Así por ejemplo, en la figura 6 se representa el espectro de reflectividad (entre 2100 y 2400 nm) de muestras correspondientes a arcillas conglomeradas (depósitos cuaternarios) con distinto contenido en arcillas y carbonatos.

En la gráfica inferior de la figura 6 se representa la segunda derivada de los espectros de reflectividad en el mismo intervalo de longitudes de onda. Además de realzar notablemente los rasgos de absorción (que ahora aparecen como máximos), estas curvas resultan ser independientes del "brightness" de los espectros originales (que venían afectados por factores externos a las rocas además de a su propia composición mineralógica), de forma que los espectros correspondientes a la segunda derivada aparecen "ordenados" en función del contenido mineralógico, existiendo una correlación significativa entre la intensidad del rasgo de absorción (que viene dada por la amplitud de la onda en la segunda derivada) y los análisis mineralógicos.

independencia de las propiedades ópticas del suelo de fondo, presentando claras ventajas sobre el NDVI, más sensible a las mismas. Por lo tanto, estas magnitudes asociadas al límite rojo de los espectros desempeñan la misma función que la combinación de bandas para datos de baja resolución espectral y se podrían considerar como *índices de vegetación de alta resolución espectral*.

Por otra parte, y en cuanto al estudio de la reflectividad de rocas con distinta composición mineralógica, cabría decir que la derivada segunda de los espectros no sólo evidencia sustancialmente la presencia de rasgos de absorción en los mismos, menos detectables en el espectro original, sino que ordena los espectros según su contenido en distintos minerales, permitiendo definir correlaciones entre la amplitud de la onda en la segunda derivada (intensidad del rasgo de absorción) y su composición mineralógica.

5.- REFERENCIAS

- Filella, I. and Peñuelas, J. 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Int. J. Remote Sens.* 15: 1459-1470.
- García-Haro, J. 1994. Inversión de un modelo lineal de reflectividad para la obtención de parámetros relacionados con la cubierta vegetal en paisajes semiáridos. Tesis de Licenciatura. Universitat de València, Facultat de Física, Departament de Termodinàmica.
- García-Haro, J., Gilabert, M.A. and Meliá, J. 1996a. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical data. *Int. J. Remote Sens.* (en revisión editorial).
- García-Haro, J., Gilabert, M.A., Younis, M.T. y Meliá, J. 1996b. Análisis de composición espectral (ACE) basado en un modelo lineal de reflectividad para el estudio de la vegetación en una zona semiárida. VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, 20-22 Septiembre 1995, Valladolid (en este volumen).
- Gilabert, M.A., Campos, J.A., Younis, M.T. y Meliá, J. 1996a. Seguimiento del maíz por radiometría de campo en la zona experimental EFEDA. El NDVI como indicador del crecimiento. V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, 10-12 Noviembre 1993, Las Palmas de Gran Canaria (en prensa).
- Gilabert, M.A., Gandía, S. and Meliá, J. 1996b. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sens. Environ.* (en prensa).
- Horler, D.N.H., Dockray, M. and Barber, J. 1983. The red edge of plant reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 4: 273-288.
- O'Haver, T.C. 1979. Derivative and wavelength modulation spectrometry. *Analytical Chemistry* 51: 90A-100A.
- Vane, G. and Goetz, A.F.H. 1988. Terrestrial imaging spectroscopy. *Remote Sens. Environ.* 24: 1-29.
- Younis, M.T. 1993. Caracterización y discriminación espectral, mediante radiometría de campo e imágenes Landsat-5 TM, de unidades litológicas en el área de Alcantarilla, Murcia. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

AGRADECIMIENTOS

Parte del trabajo presentado en esta comunicación ha sido financiado por los proyectos EFEDA y MEDALUS de la CE.