

## **ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN ESPECTRAL (ACE) BASADO EN UN MODELO LINEAL DE REFLECTIVIDAD PARA EL ESTUDIO DE LA VEGETACIÓN EN UNA ZONA SEMIARIDA**

F.J. García-Haro, M.A. Gilabert Navarro, M.T. Younis y J. Meliá Miralles  
*Dpto. de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València.  
Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot, Valencia.  
Tfno: 96 - 3864350; Fax: 96 - 3642345; E-mail: garciaja@vm.ci.uv.es*

**RESUMEN.**- El Análisis de Composición Espectral (ACE) es una técnica de reciente desarrollo en teledetección que permite estudiar la proporción de materiales presentes dentro de un pixel y, por tanto, su distribución a través de la imagen. En primer lugar se describe una experiencia desarrollada en el laboratorio orientada a la validación de esta técnica en la que se han diseñado un conjunto de superficies que varían tanto en la densidad de vegetación como en el color del suelo. La precisión obtenida por el ACE ha resultado ser suficiente para su aplicación al estudio de la vegetación con datos de satélite. Finalmente, esta metodología se ha aplicado a una imagen Landsat-5 TM perteneciente a la Cuenca del Guadalentín con el fin de obtener un mapa de vegetación natural más independiente de las propiedades ópticas del suelo que los índices de vegetación tradicionales como el NDVI.

**ABSTRACT.**- Spectral mixture modelling (SMM) has developed in recent years as a suitable tool to analyse the distributional composition of ground surfaces from remotely sensed data. Our work has been focused to test SMM potentiality to extract vegetation related parameters from optical reflectance data. Firstly, high resolution spectral radiometric measurements of ground mixtures of vegetation and soil were carried out in a laboratory experiment to test the validity of the mixture modelling. It is concluded that the accuracy attainable by this modeling approach is considered sufficient to address vegetation in satellite applications. Finally, the procedure has been applied to a Landsat-5 TM scene covering the Guadalentín Basin in order to obtain a map of natural vegetation less affected by soil optical properties than traditional vegetation indices such as NDVI.

### **1.- INTRODUCCION**

En paisajes semiáridos, con vegetación escasa y dispersa, la contribución del suelo a la reflectividad del pixel es fundamental, lo que limita la utilidad de los índices de vegetación tradicionales. En este trabajo se ha desarrollado una metodología orientada a la obtención de un mapa de la vegetación que sea lo más independiente posible del tipo de suelo de fondo, que permita hacer el seguimiento de la vegetación en zonas semiáridas. Este método, llamado Análisis de Composición Espectral (ACE), permite estimar la distribución de materiales dentro de cada pixel. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en geología (Thomson and Salisbury, 1993) y estudios de vegetación (Shimabukuro and Smith, 1991). El ACE se basa en un modelo lineal de reflectividad que genera la reflectividad de cada pixel de la imagen de una forma aditiva a partir de la reflectividad de un número reducido de componentes (patrones o *endmembers*) característicos de los materiales macroscópicos presentes dentro del pixel. Desde el punto de vista físico, ello es equivalente a suponer que el flujo de radiación recibido por el sensor procedente de un pixel es el resultado de la adición de los flujos





fracciones aceptables físicamente existen procedimientos alternativos que, sin embargo, son computacionalmente costosos y proporcionan estimadores sesgados (Lawson and Hanson, 1974; Shimabukuro and Smith, 1991; Settle and Drake, 1993; García-Haro, 1994). Nosotros hemos aplicado un método sencillo que consiste en asignar el valor 0 a las fracciones negativas, renormalizando el resto de las fracciones, de forma que siguiesen sumando la unidad. El resultado primario de este método son imágenes que representan la abundancia de las componentes en la escena (es decir, mapas de distribución de los distintos materiales) y, opcionalmente, la extensión de cada componente dentro de la misma, por ejemplo, con fines de inventario forestal, productividad de biomasa, etc. (Settle and Drake 1993).

### 3.- EXPERIENCIA DE LABORATORIO

En la experiencia diseñamos 21 *plots* que correspondían a 7 valores de LAI, entre 0 (suelo desnudo) y 2.4 (cubierta vegetal densa) sobre tres tipos de suelo. Los *plots* eran macetas de invernadero (de dimensiones 29cm x 42cm), en cuyos huecos se introdujeron plantas de una misma especie, repartidas uniformemente. Las plantas presentaban una altura entre 20 y 30 cm y eran de *Quercus ilex*, que es una especie bastante representativa de la vegetación natural presente en los bosques mediterráneos y en áreas semidesérticas. El sustrato original presentaba un claro dominio de arcillas rojas, y fue recubierto con dos cantidades distintas de carbón con el fin de alterar sus propiedades ópticas, obteniendo tres tipos de suelos: original, cubierto con una cantidad intermedia de carbón (16 g/m<sup>2</sup>) y completamente ennegrecido con carbón (40 g/m<sup>2</sup>).

Las medidas del factor de reflectividad, que se realizaron en laboratorio para evitar su posible dependencia con las condiciones medioambientales, se hicieron desde el nadir con el espectroradiómetro SIRIS, utilizando como referencia un blanco Spectralon (Gilabert, 1990). Se hicieron tres réplicas de cada medida y se tomó el valor medio. Asimismo, se aplicaron filtros para reproducir las ventanas espectrales del sensor TM. Las medidas del LAI se obtuvieron mediante un LICOR-2000 LAI Canopy Analyzer, que utiliza un método indirecto basado en la transmisividad de la radiación solar difusa a través de la cubierta vegetal (Welles and Norman, 1991).

La figura 1 muestra los espectros de reflectividad de los patrones tomados en la experiencia: suelo, vegetación (con una cobertura vegetal del 100%), sombra y carbón.

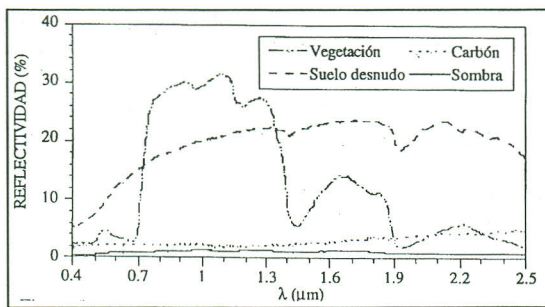


Figura 1.- Espectros de las cuatro componentes puras.

Los espectros de vegetación y suelo presentan un gran contraste espectral, lo cual permite su identificación y separación. La sombra y carbón tiene una respuesta espectral similar y muy baja en todas las longitudes de onda. Como consecuencia, la separación espectral de las

cuatro componentes es difícil, hecho que fue confirmado a partir del análisis factorial (AF). El AF identificó como dominantes los factores de las componentes suelo y vegetación y en menor grado el de una tercera componente que se puede atribuir a sombra y/o carbón y que no se pueden separar espectralmente de una forma precisa. Por ello se tomaron únicamente tres componentes:

$\Sigma$  suelo, vegetación y sombra (para las macetas sin carbón).

$\Sigma$  suelo, vegetación y carbón (para el resto).

La figura 2 muestra los espectros de reflectividad medido, modelizado (suma de la reflectividad de los patrones pesada por la proporciones calculadas) y el residuo (diferencia entre ambos) para uno de los plots. Dado el buen acuerdo del modelo teórico, aplicamos un test de fiabilidad  $\chi^2$  para determinar si pueden atribuirse las desviaciones a errores instrumentales. Con un nivel de confianza del 95%, casi todos los plots superaron el test, lo cual parece indicar que la mayor parte de la variabilidad espectral ha podido ser modelizada.

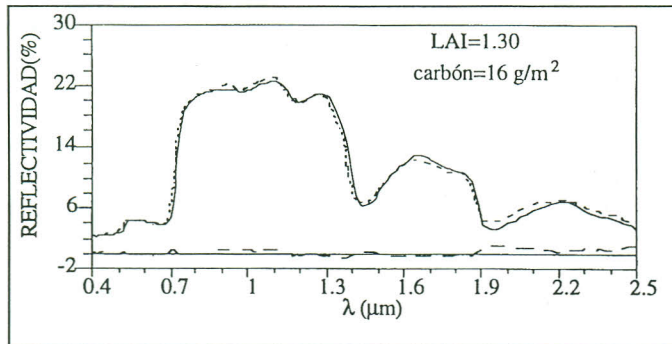


Figura 2.- Espectro original (trazo continuo), modelizado (trazo punteado) y residuo (abajo) para un plot con 16 g/m<sup>2</sup> carbón y LAI intermedio.

Antes de analizar los valores obtenidos mediante la aplicación del ACE, estudiaremos brevemente el comportamiento del índice de vegetación normalizado (NDVI). En la figura 3 hemos representado los valores del NDVI en función del LAI, donde cada trama corresponde a un tipo distinto de suelo. Se observa que el NDVI aumenta monótonamente con la cantidad de vegetación, con un tramo inicial hasta LAI=1.5, a partir del cual se satura.

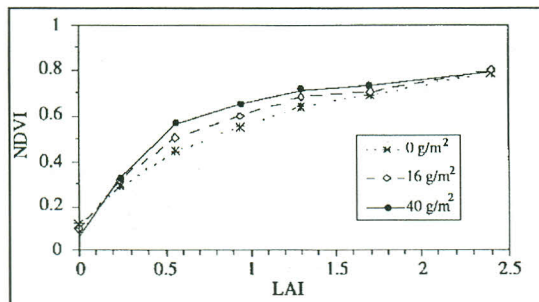


Figura 3.- Valores de NDVI en función del LAI para los tres suelos con diferente cantidad de carbón.

Sin embargo, es de destacar la dependencia del NDVI con las propiedades ópticas del suelo, que es mayor para valores intermedios del LAI, lo que pone de manifiesto la limitación de éste índice en estudios relacionados con zonas que presentan vegetación dispersa.

La figura 4 muestra las fracciones de vegetación obtenidas por medio del ACE, en función del LAI. El análisis de los errores nos ha llevado a valorar que la indeterminación asociada en el cálculo de las fracciones es del 2% (García-Haro et al., 1996). Se observa que la fracción de vegetación presenta una mayor linealidad que el NDVI no saturándose todavía en el intervalo de valores del LAI considerado. Además, ésta presenta la ventaja respecto al LAI de ser menos sensible al color del sustrato de fondo. Por tanto normaliza mejor las perturbaciones introducidas en la señal por las propiedades ópticas del suelo. Otra ventaja de ésta técnica es que proporciona la contribución de las distintas componentes, con lo que nos permite modelizar mejor el sistema de estudio (por ejemplo, utilizar la fracción de sombras para obtener información estructural acerca de la vegetación).

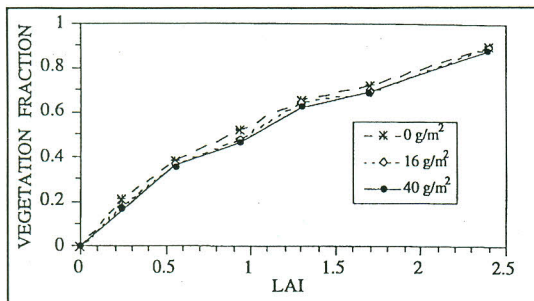


Figura 4.- Valores de la fracción de vegetación obtenida mediante el ACE en función del LAI para los tres suelos.

El procedimiento descrito se llevó a cabo asimismo con datos de reflectividad de baja resolución espectral (unicamente las seis bandas ópticas del sensor TM) obteniendo unos resultados similares (que diferían tan solo en un 1%), lo que revela que gran parte de la información espectral está contenida por estas seis bandas en estudios relativos a la vegetación.

#### 4.- APLICACION A IMAGENES THEMATIC MAPPER

El objetivo final es la aplicación del ACE a imágenes del sensor TM para el estudio de la vegetación en paisajes semiáridos, como el de la Cuenca del Guadalentín. Esta zona se caracteriza, desde el punto de vista de la cubierta vegetal por presentar un dominio de zonas recubiertas por matorral disperso (en algunos casos, prácticamente el suelo está desnudo) y con presencia de algunos cultivos de regadío o zonas forestales. Desde el punto de vista litológico, en la zona se pueden encontrar distintos tipos de rocas sedimentarias y metamórficas, lo que origina una gran variabilidad en cuanto a las propiedades ópticas del sustrato sobre el que se asienta la vegetación.

En este paisaje encontramos una gran variedad de firmas espectrales que se corresponderán con los distintos materiales macroscópicos cuya mezcla determinará la respuesta de todos los pixels de la imagen. La figura 5a muestra los espectro de reflectividad (en bandas TM) correspondiente a las litologías dominantes en esta área: cuaternario,



carbonatos, yeso, filitas, margas y grauwacas. La figura 5b muestra los espectros de los patrones correspondientes a las componentes de vegetación considerados: matorral, cultivo y bosque. El matorral presenta una respuesta típica de vegetación con poca actividad fotosintética (e incluye además materiales tales como troncos, tallos, hojarasca, etc.).

Dado que tenemos un número muy elevado de materiales en la escena, no se pueden utilizar simultáneamente como componentes dominantes para la aplicación del ACE sino un número más reducido, que en base a la experiencia previa y a que sólo contamos con 6 bandas espectrales hizo aconsejable reducir a 3, dado que un número mayor daría lugar a un error grande en los resultados y además se complicaría en exceso su interpretación. Por ello, y dado que la inversión se hace pixel a pixel, para cada pixel individual se utilizaron 3 componentes:

El correspondiente a la reflectividad del sustrato, que se extrajo a partir de una clasificación litológica del área de estudio (Medalus I, final Report, 1992).

El correspondiente a vegetación de tipo matorral.

Una tercera componentes que se correspondería bien con vegetación verde perteneciente a cultivos (muy activa fotosintéticamente), o bien con vegetación típicamente forestal (cuyo espectro está muy influenciado por la presencia de sombras).

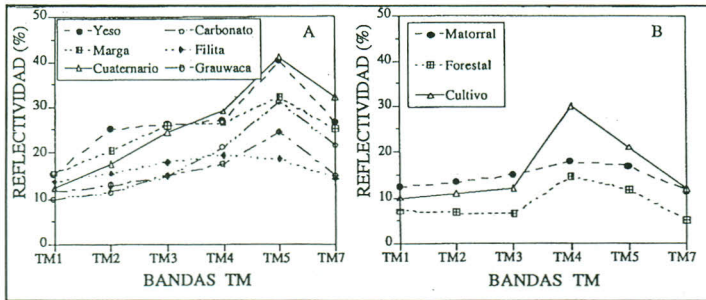
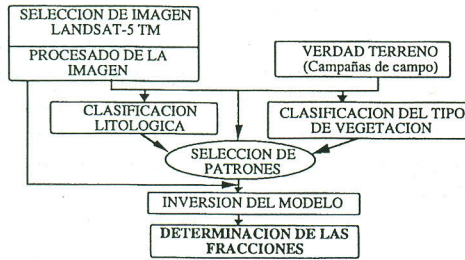


Figura 5.- Espectros de reflectividad de los patrones considerados en el ACE.

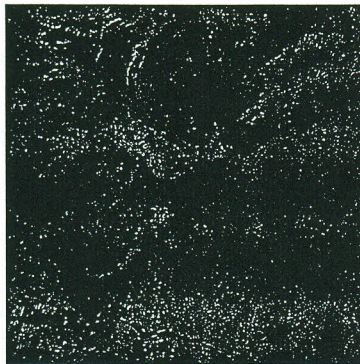
Con el fin de decidir qué patrón tomar en cada pixel de la imagen para la tercera componente (bien cultivo o bien forestal) se puede realizar una clasificación en tipos de cubierta, o también aplicar el ACE con las dos opciones (1) suelo, matorral, bosque y (2) suelo, matorral, cultivo. Nosotros empleamos este segundo método, de modo que identificamos cuál de los dos tipos de vegetación modelizaba mejor la reflectividad del pixel a partir del residuo obtenido con los conjuntos de patrones (1) y (2).

El diagrama de flujo del procedimiento experimental seguido se muestra en la figura 6. Como resultado, se generan las fracciones de las cuatro componentes: suelo desnudo, matorral, cultivo y bosque, así como la imagen de residuos, que presumiblemente tendrá valores altos en aquellas áreas que no hayan sido modelizadas adecuadamente, y puede servir para identificar la presencia de materiales que no hayan sido consideradas en la modelización. La figura 7 es una composición en falso color con las fracciones de las tres componentes de vegetación perteneciente al 7 de Abril de 1993. Se trata de un zona de 30x30 km dentro del área de estudio que presenta gran variedad de litologías y tipos de vegetación. En color rojo se ha representado la fracción de matorral, en azul la fracción de bosque y en verde la de cultivo. Las áreas con mayor contribución de suelo aparecen en tonos oscuros (dado que las fracciones de los tres tipos de vegetación presentan valores bajos).



**Figura 6.-** Metodología empleada para aplicar el ACE a una escena Landsat.

Los primeros análisis cualitativos de estos resultados han puesto de manifiesto que las imágenes de fracción de vegetación están menos afectadas por las propiedades ópticas del suelo y son más sensibles a la presencia de pequeñas cantidades de vegetación que las de NDVI analizadas para la misma zona. Asimismo, la imagen de residuos presenta valores razonablemente pequeños. No obstante, existe algún inconveniente para la aplicación del ACE, destacando la dificultad de la elección de los patrones, y la influencia de esto en los resultados. En el caso de que la escena hubiera sido corregida totalmente de los efectos radiométricos (atmosférico y topográfico), los patrones se podrían seleccionar a partir de librerías de espectros medidos en el campo. Dado que la escena no estaba totalmente corregida, los patrones fueron extraídos directamente de la imagen. En este caso es especialmente problemática la selección del patrón para la componente matorral, dado que fue imposible encontrar ningún pixel completamente cubierto de matorral y sin contribución del suelo, y además porque el matorral presenta poca separabilidad espectral respecto del suelo, dada su baja actividad fotosintética.



**Figura 7.-** Falso color con las fracciones de vegetación obtenidas por medio del ACE (rojo = matorral, verde = cultivo, azul = bosque) (C. 22)

## 5.- CONCLUSIONES

Consideraciones teóricas y experimentales sugieren la adecuación del ACE para el estudio de la vegetación en zonas semiáridas, dado que permite aprovechar toda la información

multi-espectral que proporcionan las imágenes de satélite para desacoplar la información de la señal de factores externos (iluminación, propiedades ópticas del suelo, etc.) minimizando su influencia. Dicho desacople queda garantizado al tomar para cada pixel de la imagen el patrón de suelo específico del sustrato de fondo sobre el que se asienta. Los resultados parecen confirmar que las seis bandas del sensor TM permiten separar con bastante precisión la contribución de tres componentes (una correspondiente al suelo de fondo y las otras dos a los dos tipos de vegetación dominantes en el pixel). No obstante, las fracciones derivadas no son magnitudes absolutas sino que dependen del conjunto de patrones utilizado. Actualmente estamos trabajando en evaluar como afecta la elección de los patrones en las fracciones resultantes. Asimismo, estamos en proceso de validación cuantitativa de los resultados mediante la utilización de medidas de distintos parámetros (LAI, biomasa, cubierta vegetal, etc.) en parcelas de tamaño suficientemente representativo a nivel de satélite, con el fin de interpretar mejor el significado de las fracciones de vegetación. La aplicación de esta metodología a imágenes de distintas fechas permitirá potencialmente seguir la evolución temporal de la cubierta vegetal con la frecuencia deseada.

## 6.- REFERENCIAS

- Frodesen, A. G., Skjeggstad, O., and Tøfte, H. 1979. Probability and Statistics in particle physics. Norway. Universitetsforlaget.
- García-Haro, F. J. 1994. Inversión de un modelo lineal de reflectividad para la extracción de parámetros relacionados con la vegetación en paisajes semi-áridos. Tesis de licenciatura. Universitat de València.
- García-Haro, J., Gilbert, M.A. & Meliá, J. 1996. Linear spectral mixture modelling to estimate amount of vegetation from optical spectral data. *International Journal of Remote Sensing* (en revisión editorial).
- Gilbert, M.A. 1990. Caracterización radiométrica en el intervalo solar, de cultivos cítricos. Modelo geométrico de reflectividad de aplicación en teledetección, Valencia, tesis doctoral, Universitat de València.
- Knorr, F. J. and Futrell, J. H. 1979. Separation of mass spectra of mixtures by factor analysis. *Analytical Chemistry*. **51**: 1236-1241.
- Lawson, C. L., and Hanson, R. J. 1974. Solving least squares problems. Englewood Cliffs, NJ. MEDALUS I Final report (1995). Internal report presented to MEDALUS office.
- Settle, J. J., and Drake, N. A. 1993. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *International Journal of Remote Sensing*. **14**: 1159-1177.
- Shimabukuro, Y. E., and Smith, A. J. 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*. **29**: 16-20.
- Thomson, L. J., and Salisbury, J. W., 1993, The Mid-Infrared reflectance of mineral mixtures (7-14 mm). *Remote Sensing of Environment*. **17**: 37-53.
- Welles, J.M. and Norman, J.M. 1991. Instruments for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*. **83** (5): 818-825
- Younis, M.T. 1993. Caracterización y discriminación espectral, mediante radiometría de campo e imágenes Landsat-5 TM, de unidades litológicas el area de Alcantarilla. Murcia. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo ha sido financiado por el proyecto MEDALUS de la CE.