

# APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN BASADA EN LA TÉCNICA DE MEZCLAS LINEALES PARA LA CARTOGRAFÍA DE INCENDIOS FORESTALES EN ESPAÑA

C. QUINTANO (1), J. DELGADO (2), Y. SHIMABUKURO (3) y A. FERNÁNDEZ (4)

(1) Departamento de Tecnología Electrónica. C/ Francisco Mendizabal s/n, 47014 Valladolid.

(2) Departamento de Física Aplicada I. Av. Madrid s/n, Palencia

(3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos - Brasil

(4) Departamento de Ingeniería Agraria. Av. Astorga s/n, Ponferrada (León)

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los pasos seguidos para obtener una metodología de trabajo válida que permita cartografiar los grandes incendios forestales (mayores de 500 ha) ocurridos en España a partir de imágenes de satélite empleando la técnica de mezclas lineales.

P.C.: teledetección, mezclas lineales, incendios forestales

## SUMMARY

In this work, the authors present the steps to obtain a valid work methodology that allows mapping forest fires (> 500 ha) happened in Spain, starting from satellite images and lineal mixture analysis.

K.W.: remote sensing, lineal mixture, forest fires

## INTRODUCCIÓN

Cada año se producen en España un elevado número de grandes incendios forestales (mayores de 500 ha), siendo incuestionable la utilidad de los satélites de teledetección para la prevención y estudio de dichos incendios. Considerando estas ideas el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV) ha llevado a cabo diversos estudios para prevenir incendios, detectar focos y evaluar los daños ocasionados por el fuego. El presente trabajo sigue la línea de investigación anterior, siendo uno de sus objetivos generales plantear una metodología de trabajo para aplicar el modelo de mezclas lineales a imágenes de satélite, y cartografiar e inventariar las superficies afectadas por grandes incendios forestales.

Según indicaban VAN DER MEER & JONG (2000), la radiancia reflejada de un pixel tal y como se observa en teledetección rara vez ha interactuado con un volumen de un único y homogéneo material (estas superficies no abundan). Normalmente, el valor de reflectancia de un pixel procede de la mezcla espectral de las clases espectrales presentes en la superficie. SINGER & McCORD (1979) mostraron que si la escala de mezcla es macroscópica, tal como la de los fotones interactuando con materiales diversos, la mezcla podía ser considerada lineal.

La descomposición espectral o 'unmixing' trata de encontrar la proporción de los componentes espectrales puros que mejor explican el espectro de reflectancia observado. Esta técnica se basa en la inversión de matrices, por lo que cuando los espectros de los componentes puros no son ortogonales y la matriz no es invertible (habitualmente), se cometen errores. Este problema se agudiza cuando se emplean imágenes de baja resolución espectral, debido a la similitud de los espectros de los componentes básicos (BASTIN, 1997, FOODY *et al.*, 1997, NOVO & SHIMABUKURO, 1997).

Si el vector  $\mu_i = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}\}$  representa la señal esperada para los pixeles que contienen sólo la componente básica  $i$ , el valor esperado de la señal para un pixel mezcla, bajo suposición de linealidad, será:  $f_1\mu_1 + f_2\mu_2 + \dots + f_n\mu_n = Mf$ ; donde las columnas de la matriz  $M(n \times c)$  son los vectores  $\mu_i$  o espectros de los componentes básicos, 'n' es el número de bandas del sensor y 'c' el número de componentes básicos considerados. Estos (hipotéticos) pixeles puros no solo tendrán valores de señal correspondientes a una cubierta, sino que a causa del ruido del sensor tendrán unas fluctuaciones estadísticas caracterizadas por la matriz de covarianza  $E_i$ . En consecuencia, los pixeles-

mezcla tendrán una fluctuación alrededor de su valor medio,  $\mathbf{Mf}$ , caracterizado por la matriz de covarianza  $\mathbf{E}(\mathbf{f})$ . Como habitualmente  $\mathbf{E}(\mathbf{f})$  se supone independiente de  $f$ , el modelo lineal puede definirse como:  $\mathbf{x} = \mathbf{Mf} + \mathbf{e}$  donde  $\mathbf{e}$  es el vector de error de predicción en el vector de proporciones estimadas, que es una variable aleatoria que tiene media cero ( $\mathbf{E}(\mathbf{e}) = 0$ ) y matriz de covarianza  $\mathbf{E}(\mathbf{e}\mathbf{e}') = \mathbf{E}$ .

Sin embargo, a menudo las soluciones obtenidas al resolver el sistema planteado, a pesar de ser matemáticamente correctas, son físicamente inaceptables, por lo que, en la mayoría de los casos se añaden condiciones de límite. En el ámbito de los modelos de mezclas las dos restricciones empleadas son: 1.- la suma de las proporciones obtenidas para cada pixel debe ser uno ( $\sum f_i = 1$ ) y 2.- los valores de dichas proporciones deben ser positivos ( $0 \leq f_i$ ).

## **MATERIAL Y METODOS**

Para llevar a cabo el objetivo previsto ha sido necesario, en primer lugar realizar una revisión bibliográfica exhaustiva tanto sobre el análisis de mezclas lineales, como sobre el estudio de incendios mediante teledetección. Una vez realizada la revisión, y dado que en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, (Brasil), se emplea esta técnica relacionándola con deforestación e incendios, se realizó una estancia para estudiar su aplicación a la cartografía de incendios en la Amazonía. Por último, y para poder verificar la propuesta metodológica, los autores están trabajando sobre los grandes incendios forestales producidos en el año 1994 en el Levante español.

## **RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN**

En este apartado presentaremos los resultados de la recopilación de información que se ha efectuado, y que permitirán establecer los fundamentos o bases de la metodología que será propuesta a continuación (también en este apartado). Para finalizar, indicaremos brevemente los resultados obtenidos en el estudio de la zona piloto (Levante).

### **Fundamentos de la metodología propuesta**

Respecto a la primera fase o etapa del trabajo, la revisión bibliográfica, ésta se ha centrado fundamentalmente, en cómo seleccionar los espectros de los componentes básicos empleados en la descomposición espectral y en cómo resolver el sistema de ecuaciones.

Respecto al primer punto, los conceptos fundamentales pueden sintetizarse en los siguientes: 1.- Los espectros de los componentes básicos deben tener características reconocibles en la escena y ser significativos para el observador; 2.-En muchos casos el número de componentes y su composición es desconocido y el problema es descomponer los datos en un número tal que sea soportado por la dimensión de la escena; y 3.-La estimación de estos espectros básicos no es fácil ya que cambian con la escala y el propósito de estudio, y dependen de procesos como la dispersión en la superficie y la geometría de la iluminación que podrían considerarse como fuentes adicionales de ruido al realizar el modelo.

SETTLE & CAMPBELL (1998) indican que existen dos esquemas de trabajo para obtener los espectros de los componentes básicos o 'endmembers'. El primero de ellos emplea valores de reflectancia obtenidos de librerías espectrales ('reference endmembers'). A partir de los espectros seleccionados de la librería, se interpreta la imagen previamente calibrada y corregida atmosféricamente en términos de mezclas de los mismos. Uno de los inconvenientes de esta opción es que la corrección de la imagen no es trivial y siempre se introducen errores. La segunda opción emplea información de la propia imagen ('imagen endmembers'). Es posible que el espectro de un componente básico se iguale al espectro de un pixel donde se conozca que sólo existe ese componente básico o a la media de espectros de varios pixeles homogéneos; pero también es posible que no existan pixeles que contengan un único componente y sea necesario entonces emplear información de otras fuentes (imágenes de mayor resolución, por ejemplo).

CHUVIECO (1996) indica que en el caso de trabajar con imágenes AVHRR, localizar áreas homogéneas resulta complicado dado el tamaño del pixel por lo que en muchas ocasiones se deducen los espectros de los componentes básicos a partir de imágenes de alta resolución, previamente registradas y calibradas con las AVHRR, mediante técnicas de regresión o degradando artificialmente las imágenes de alta resolución hasta obtener el tamaño del pixel AVHRR. (HOLBEN & SHIMABUKURO, 1993, HLAVKA & SPANNER, 1995, KERDILES & GRONDONA, 1995, CAETANO *et al.*, 1994).

Respecto a la forma de resolver el sistema de ecuaciones lineales planteado, podemos afirmar que existen diferentes métodos para resolver las ecuaciones presentadas y realizar la descomposición espectral (error mínimo cuadrado, programación cuadrática, técnicas de inversión, análisis de factores, ...), aunque algunos autores (KALLURI *et al.*, 1997, SHIMABUKURO, 1987) afirman que el tipo de algoritmo empleado para la obtención de las proporciones tiene poca influencia en los resultados.

La mayor parte de las técnicas empleadas para resolver el sistema tratan de minimizar el error cuadrático de la estimación o solución. Dentro de éstas, una de las más ampliamente empleadas es la propuesta por SHIMABUKURO & SMITH (1991). Sin embargo, también es posible mencionar la descomposición en valores singulares (GONG *et al.*, 1994) y la ortogonalización de Gram-Schmidt. Por otra parte, y según SETTLE & DRAKE (1993) el empleo de programación cuadrática proporciona resultados muy similares ya que se basa también en la minimización de la función de error.

En la segunda etapa de la investigación, estancia en el INPE, el trabajo se centró en el estudio de la aplicación de la técnica de mezclas lineales a la cartografía de incendios y zonas deforestadas en Rondonia y Amazonia (Brasil), siguiendo la metodología empleada en el INPE. Los investigadores de este centro de investigación han realizado un entorno informático, SPRING, especialmente pensado para trabajar con el modelo de mezclas. Habitualmente, se emplean tres componentes puros o básicos en el proceso de descomposición: vegetación, suelo y sombra, cuyos espectros se obtienen de la imagen analizada (no se emplean librerías espectrales). El sistema de ecuaciones se resuelve siguiendo el método de mínimos cuadrados, incluyendo las dos restricciones antes mencionadas. Los resultados son altamente satisfactorios.

### **Metodología propuesta**

Tras integrar toda la información recopilada, los autores proponen una metodología basada en las siguientes etapas.

#### **1.-Preprocesamiento de las imágenes.**

En primer lugar es preciso someter a dichas imágenes a diferentes tratamientos: corrección geométrica o georreferencia, calibración, para obtener los albedos y temperaturas de brillo, y detección de zonas contaminadas por nubes. Todos estos procedimientos constituyen lo que se denomina el preprocesamiento de las imágenes y se ha llevado a cabo mediante software desarrollado por el grupo de trabajo del LATUV. (ILLERA *et al.*, 1995, DELGADO, 1991).

#### **2.-Modelo de mezclas.**

El modelo lineal de mezclas estima las proporciones de los componentes básicos existentes en cada píxel de la imagen a partir de la respuesta espectral en las diferentes bandas de la imagen de satélite. En este caso, se considerarán tres componentes básicos: suelo, vegetación y sombra. (SHIMABUKURO & SMITH, 1991). Una vez planteado el sistema de ecuaciones, se obtienen tres imágenes de bandas sintéticas que representan la proporción de vegetación, suelo y sombra existente en cada píxel. En este trabajo la firma espectral de los componentes puros considerados se ha extraído de las propias imágenes a las que se aplicará el modelo de mezclas.

#### **3.-Postprocesamiento.**

En esta etapa se presentan diferentes alternativas según se siga un enfoque multitemporal (empleando imágenes de antes y después del incendio) o uno unitemporal (una imagen posterior al

fuego). La mayor parte de las aplicaciones de las imágenes de satélite a la cartografía de incendios realizan un análisis multitemporal basado en el brusco cambio producido en la cubierta vegetal por el incendio. Sin embargo, existen algunos factores externos que pueden provocar cambios en la cubierta similares a los producidos por los incendios (cosecha de algunos cultivos de secano, por ejemplo), lo cual dificulta enormemente la interpretación de la imagen de cambios obtenida. Para evitar estos problemas es posible efectuar un estudio unitemporal.

Los enfoques multitemporales propuestos en esta metodología son dos: un análisis de cambios en la imagen diferencia de una imagen anterior y otra posterior al fuego, y la aplicación de técnicas de regresión sobre la imagen inicial para comparar la imagen estimada con la imagen posterior al fuego real. Ambas técnicas han sido probadas con éxito tanto para imágenes NOAA como Landsat empleando como referencia la imagen NDVI. Los autores proponen en esta ocasión el empleo de las imágenes fracción obtenidas al aplicar el modelo de mezclas lineales (sobre todo, la fracción vegetación que presenta una alta correlación con la imagen NDVI).

Respecto al enfoque unitemporal, los pasos seguidos se resumen en: 1.-Segmentación y clasificación. Se propone el uso de la segmentación de imágenes, como una fase previa a la etapa de clasificación (INPE-DPI, 1999). En el proceso de segmentación, se divide la imagen en regiones que deben corresponder a las áreas de interés de la aplicación. Para efectuar la clasificación de las imágenes segmentadas, se empleó un algoritmo de agrupamiento de datos no supervisado, que agrupa las regiones anteriormente obtenidas partir de una medida de similitud entre las mismas. 2.-Identificación de la clase 'QUEMADO'. El objetivo de esta etapa es la identificación de la clase 'Quemado' dentro de todas las clases definidas por el clasificador en la etapa anterior, para aislar los píxeles correspondientes a zonas afectadas por incendios del resto de los píxeles de la imagen. Para ello, se consideró la información procedente de la imagen de la banda 3 (térmica), y se etiquetaron como clase 'Quemado, las clases cuyos píxeles presentaban unos valores elevados en la banda 3.

#### 4.-Verificación de resultados.

Una vez aislados en toda la península los píxeles teóricamente afectados por un incendio, se calcularon las matrices de error, relacionando la imagen verdad-terreno de cada incendio considerado (obtenida mediante la rasterización de la imagen vectorial del perímetro del incendio proporcionado por el MMA) con la imagen estimación obtenida.

### **Trabajo en el Levante español**

En esta última etapa del trabajo, todavía en fase de realización, se trata de comprobar el buen comportamiento de la metodología propuesta para cartografiar y estimar el área afectada por dos grandes incendios producidos en 1994 en el Levante español: Alto Mijares (Castellón), 19 310 ha quemadas y Millares (Valencia), 25 930 ha.(ICONA,1994).

El enfoque unitemporal ha sido comprobado empleando imágenes del sensor AVHRR obteniendo resultados satisfactorios (índice kappa mayor que 0.7). Los autores desean repetir los cálculos empleando en esta ocasión imágenes del satélite Landsat para analizar los efectos de la resolución espacial empleada.

## **CONCLUSIONES**

Se ha presentado una nueva metodología basada en el empleo del modelo de mezclas lineales aplicada a la cartografía de grandes incendios forestales, cuya gran ventaja es su fácil comprensión dado el significado físico de las imágenes fracción obtenidas tras la aplicación del modelo de mezclas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Parte de este trabajo ha sido realizado durante una estancia del primer autor en el Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), financiada por la Universidad de Valladolid.

## **BIBLIOGRAFÍA**

BASTIN, L; (1997). *Comparison of Fuzzy C-Means Classification, Linear Mixture Modelling and MLC Probabilities as Tools for Unmixing Coarse Pixels*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 18, núm. 17. Págs. 3629–3648.

CAETANO, M., L. MERTES & J. PEREIRA; (1994). *Using spectral mixture analysis for fire severity mapping*. Proc. 2º Int. Conf. Forest Fire Research. Coimbra. Vol. II. C16. Págs. 667-677.

CHUVIECO, E; (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ed. Rialp.S.A. Madrid.

DELGADO, J.; (1991). *Clasificación y análisis de nubes mediante imágenes Meteosat*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Valladolid.

FOODY, G., R. LUCAS, P. CURRAN & M. HONZAK; (1997). *Non-linear Mixture Modelling Without End-Members Using an Artificial Neural Network*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 18, núm. 4. Págs. 937–953.

GONG, P., J. MILLER & M. SPANNER; (1994). *Forest Canopy Closure from Classification and Spectral Unmixing of Scene Components – Multisensor Evaluation of an Open Canopy*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 32, núm. 5. Págs. 1067–1079.

HLAVKA, C. & M. SPANNER; (1995). *Unmixing AVHRR Imagery to Assess Clearcuts and Forest Regrowth in Oregon*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 33, núm. 3. Mayo. Págs. 788–795.

HOLBEN, B. & Y. SHIMABUKURO; (1993). *Linear Mixing Model Applied to Coarse Spatial Resolution Data from Multispectral Satellite Sensors*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 14, núm. 11. Págs. 2231–2240.

ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza);(1994), *Los incendios forestales en España durante 1994. Avance Informativo*. Subdirección General de Protección de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (En la actualidad Ministerio de Medio Ambiente)

INPE-DPI (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Departamento do processamento de Imagens.); (1999). *Manual do usuario do SPRING: versao 3.4*. São José dos Campos, SP

ILLERA, P., J. DELGADO & A. CALLE; (1995). *A navigation algorithm for satellite images*. International Journal of Remote Sensing. Vol.15. Págs. 577-588.

KALLURI, S., C. HUANG, S. MATHIEU\_MARNI, J. TOWNSHEND, K. YANG & R. CHELLAPA; (1997). *A comparison of mixture modeling algorithms and their applicability to the MODIS data*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) Singapore. Págs. 171-173

KERDILES, H. & M. GRONDONA; (1995). *NOAA-AVHRR NDVI Decomposition and Subpixel Classification Using Linear Mixing in the Argentinean Pampa*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 16, núm. 7. Págs. 1303–1325.

MARTIN, M. & E. CHUVIECO; (1999). *Cartografía de grandes incendios forestales en la península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Albacete.

NOVO, E. & Y. SHIMABUKURO; (1997). *Identification and Mapping of the Amazon Habitats Using a Mixing Model*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 18, núm. 3. Págs. 663–670.

SETTLE, J. & N. DRAKE. *Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 14, núm. 6. Págs. 1159–1177.

SETTLE, J. & N. CAMPBELL; (1998). *On the Errors of Two Estimators of Subpixel Fractional Cover when Mixing is Linear*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 36, núm. 1. Enero. Págs. 163–170.

SHIMABUKURO, Y.; (1987). *Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas*. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Colarado State University.

SHIMABUKURO, Y. & J. SMITH; (1991). *The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol 29. Págs. 16-20.

SHIMABUKURO, Y., G: BATISTA, E. MELLO, J. MOREIRA & V. DUARTE; (1998). *Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat TM images of the Amazon Region*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 19, núm. 3. Págs. 535-541

SINGER, R & T. McCORD; (1979). *Mars: large scale mixing of bright and dark surface materials and implications for analysis of spectral reflectance*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Houston, USA, 19-23 march. Págs. 1835–1848

VAN DER MEER, F. & S. De JONG; (2000). *Improving the results of spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper imagery by enhancing the orthogonality of end-members*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 21, núm. 15. Págs. 2781–2797.