

## USO DE IMÁGENES AVHRR PARA EL SEGUIMIENTO DE INCENDIOS

Pozo, D., Olmo, F.J. y Alados-Arboledas L.

Grupo de Física de la Atmósfera.  
Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias.  
Universidad de Granada. 18071 Granada.  
Tfno. 958 244024. Fax. 958 243214. E-mail: alados@ugr.es

**RESUMEN:** En este trabajo presentamos una técnica multiespectral que usa imágenes del sensor AVHRR para identificar áreas incendiadas y estimar su tamaño. La aplicación multitemporal de esta técnica permite el seguimiento del desarrollo del incendio, proporcionando una rápida evaluación del área afectada por el fuego, pero suprimiendo la señal térmica ambigua producida por los terrenos baldíos. La verificación de los datos con información de campo, obtenida sobre varios fuegos que afectaron a Andalucía durante 1994, proporcionan unos resultados que, tanto en lo que se refiere a la evolución del incendio como a la evaluación de su tamaño, son satisfactorios.

### INTRODUCCIÓN

Los incendios se consideran como una de las mayores fuentes, a escala global, de aerosoles y de diversos gases traza. También inciden fuertemente en la distribución y abundancia de las especies vegetales, y por consiguiente en las propiedades de los sistemas ecológicos y de la superficie terrestre en general. La teledetección proporciona una valiosa herramienta para el seguimiento de los incendios forestales. Dentro de este ámbito parece especialmente interesante el uso de imágenes de baja resolución, tales como las que proporciona el sensor AVHRR a bordo de los satélites polares de la serie TIROS de la NOAA. Este sistema de satélites proporciona cuatro imágenes al día, considerando que haya a la vez dos satélites operativos en órbita. Muchos de los trabajos sobre incendios forestales, basados en imágenes AVHRR, están relacionados con las imágenes del infrarrojo medio proporcionadas por el canal 3 del AVHRR. Chuvieco y Martín (1994a) y Kennedy et al. (1994) proporcionan una amplia revisión sobre diferentes aplicaciones de este canal para el seguimiento de incendios. Recientemente, diferentes autores han desarrollado algoritmos contextuales (Ilicra et al., 1995; Cozzato et al. 1995). Chuvieco and Martín (1994b) han propuesto el uso de las imágenes del canal 3 para cartografiar el crecimiento de los incendios, haciendo uso de un conjunto de imágenes AVHRR adquiridas durante la actividad del fuego. Esta información dinámica sobre la evolución del incendio puede usarse como prueba para los

programas sobre el comportamiento de los incendios (Burger y Rohem, 1984; Vasconcelos y Guertin, 1992).

La ventana del infrarrojo medio (3-5 micrómetros) es particularmente interesante, debido a que está próxima al máximo de emisión espectral para objetos que radian a las temperaturas que se pueden encontrar en los incendios forestales, y también debido a que dicha ventana espectral se encuentra en una región en la que la radiación terrestre y solar es baja. El contraste entre el foco del incendio objeto de estudio y sus alrededores es, a veces, más importante a la hora de detectar una zona incendiada que el propio flujo energético emitido por la zona incendiada. Las áreas cubiertas de vegetación proporcionan un fondo apropiado que ayuda a la detección de incendios en el infrarrojo medio.

En sendos trabajos Dozier (1981) y Matson y Dozier (1981) mostraron que bajo hipótesis restrictivas la función de Planck puede invertirse, utilizando información procedente de dos o más canales espectrales, para calcular el tamaño y temperatura de regiones incendiadas a nivel de subpixel. El análisis multitemporal de los datos proporcionados por el canal 3 del AVHRR se ha usado para detectar incendios (Lee y Tag, 1990), estudiar sus características estacionales (Lanngaas, 1992) y más recientemente para seguir la evolución del incendio (Chuvieco y Martín, 1994b), discriminando pixel incendiados en cada imagen mediante la selección de un valor umbral de temperatura. Para evitar la confusión entre área quemada y suelos baldíos en imágenes diurnas se suele utilizar una máscara forestal. Aunque en la región 3.5-4 micrómetros se recibe menos del 1% de la radiación solar, esta cantidad es del mismo orden de la radiación térmica emitida por la superficie (Lee y Tag, 1990). La saturación de canal 3 del AVHRR en las pasadas de la tarde durante el verano, y la contribución de la radiación solar reflejada, crea problemas serios para el análisis cuantitativo durante el día, momento de mayor intensidad de los incendios. Este efecto es menor sobre áreas cubiertas de vegetación.

En este trabajo presentamos una técnica multiespectral que usa imágenes del sensor AVHRR para identificar áreas incendiadas y estimar su

tamaño. La aplicación multitemporal de esta técnica permite el seguimiento del desarrollo del incendio durante el día. La técnica es aplicable a áreas cubiertas por arbustos, pastizal y zonas cultivadas de árboles frutales con zonas de suelo baldío, que puede presentar reflectancias altas en el canal 3, especialmente durante el verano, la temporada de mayor riesgo de incendio en nuestra zona Mediterránea.

## DATOS

Los datos del AVHRR utilizados en este trabajo (formato HRPT) se recibieron en el Centro de Recepción y Tratamiento de imágenes de satélite de la Universidad de Granada, durante julio de 1994. Las observaciones de satélite se compararon con los informes suministrados por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Estos últimos datos incluyen el nombre, ubicación y tamaño del incendio, el contorno cartográfico de las áreas quemadas, así como las especies vegetales afectadas.

En el presente trabajo se han utilizado imágenes HRPT de los satélites NOAA-11 y NOAA-12, que fueron recibidas en el Centro de Recepción y Tratamiento de imágenes de satélite de la Universidad de Granada (CRYTIS). Debido a que durante la época en que se desarrollaron los incendios nuestro sistema de recepción de imágenes estaba en periodo de pruebas, solo fueron recogidas imágenes diurnas durante el verano de 1994. La corrección geométrica de las imágenes se ha realizado a partir de un modelo orbital para, a continuación, ajustar la navegación a las líneas costeras.

Los datos de los canales térmicos del AVHRR se han procesado para obtener las temperaturas de brillo asociadas, mientras que los datos de los canales visible e infrarrojo cercano se han procesado para obtener las correspondientes reflectancias. Solo se han usado datos correspondiente a observaciones con ángulos menores de 30° respecto al nadir.

## METODOLOGÍA

A continuación describimos el algoritmo multitemporal y multispectral propuesto. En un primer paso se aplica una máscara de costa usando la información sobre los canales visible e infrarrojo próximos. Para excluir pixels contaminados por nubes se utiliza un procedimiento basado en los trabajos de Saunder y Kriebel (1988) y Derrin et al. (1993). Después de estos pasos preliminares se aplican el conjunto de reglas de decisión multitemporales.

Para desarrollar el algoritmo hemos hecho un análisis exhaustivo de los imágenes disponibles, tanto de las previas como de las coincidentes con el incendio. Hemos constatado que el uso de un umbral simple en la temperatura de brillo del canal 3,  $T_3$ , conduce a detecciones espurias. Diferentes autores han propuesto la conveniencia de la aplicación previa de una máscara de vegetación. Este procedimiento limita solo a zonas boscosas la aplicación de los algoritmos, lo cual presenta un gran problema en nuestra región de estudio, debido a la heterogeneidad de las áreas controladas. En nuestra región encontramos mezcla de bosques de coníferas, zonas de arbustos, zonas de pastizal y zonas de árboles frutales. En este sentido, debido a las características del incendio de Lijar, el uso de un umbral único en  $T_3$  es poco conveniente.

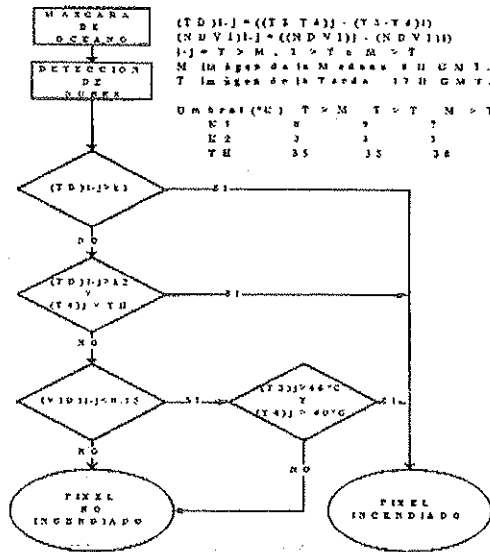


Figura 1.- Diagrama de flujo del algoritmo de detección y seguimiento de incendios.

Siguiendo las sugerencias de Lee y Tag (1990) y los trabajos de Flannigan y Von der Haar (1986) hemos planteado un algoritmo de detección de incendios basado en el análisis de las diferencias de temperaturas entre los canales 3 y 4,  $T_3 - T_4$ . Ahora bien, considerando que nuestra zona de estudio no presenta características apropiadas para usar máscaras de vegetación hemos delineado el uso de un análisis de las variaciones de estas diferencias DE temperatura  $T_3 - T_4$  en un análisis multitemporal. Debido a las diferencias en la influencia solar sobre  $T_3$  hemos considerado valores diferentes del umbral para la comparación entre pasadas de mañana y tarde de los satélites NOAA-12 y NOAA-11. Con el fin de contabilizar la gama limitada de las

diferencias  $T_3 - T_4$ , debido a las altas temperaturas de brillo encontradas para estas áreas en ambos canales durante las pasadas de tarde, en ausencia de incendio, se ha incluido un criterio basado en el análisis de  $T_4$ , con el fin de modificar el umbral aplicado a la diferencia de  $T_3 - T_4$ . La figura 1 muestra un diagrama de flujo del algoritmo en el que se incluyen los umbrales empleados.

Se ha incluido una prueba final para permitir el seguimiento de pixels que estén incendiados durante dos pasadas consecutivas. Si el cambio en el índice de vegetación diferencial normalizado, NDVI, desde la imagen previa, supera un umbral fijo, y las temperaturas de brillo  $T_3$  y  $T_4$  exceden un umbral determinado, consideraremos que este pixel sigue incendiado desde la última pasada.

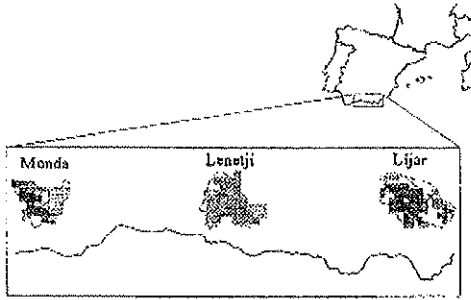


Figura 2. Aplicación del algoritmo de detección y seguimiento de incendios a los incendios de Monda, Lenteji y Lijar. Las líneas continuas corresponden a los resultados de observaciones de campo.

Se ha asignado una diferente textura a los pixels incendiados para poder seguir la dinámica del incendio. Las imágenes sucesivas se combinaron en un mapa único que muestra el crecimiento diario. De esta manera la secuencia multitemporal de imágenes permite localizar el incendio y controlar su evolución. Esta técnica se ha desarrollado sobre pasadas diurnas, comúnmente asociada a las condiciones más cambiantes en la evolución del incendio. La conveniencia de la identificación de los incendios durante el día se debe, generalmente, a su mayor actividad, asociada a valores más bajos de humedad relativa, temperaturas más altas y vientos fuertes durante el día. En este sentido Kennedy et al. (1994) han desarrollado un algoritmo para controlar incendios en las sabanas del Oeste de África durante el día.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El esquema descrito arriba se ha aplicado a varios incendios que afectaron Andalucía durante la

primera semana de Julio de 1994. Los incendios seleccionados afectaron a muy diferentes ecosistemas y presentan diferentes extensiones espaciales. Los resultados obtenidos por medio de los datos de satélite se han verificado con los informes de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Estos informes han sido obtenidos por medio de técnicas de trabajo de campo.

La figura 2 muestra los resultados de aplicación del algoritmo a tres incendios, de características muy diferentes, que se produjeron en la primera semana de Julio de 1994. En la figura se incluyen datos referentes al nivel de acuerdo de la técnica basada en imágenes AVHRR con los datos de campo. Hay que señalar que para uno de los incendios, Monda, se pudo verificar la capacidad de seguir la evolución del incendio dada la existencia de contornos diarios realizados desde tierra. El nivel de seguimiento se puede considerar óptimo, a pesar de no haber dispuesto de imágenes con la mayor frecuencia posible.

En el caso del incendio de Lenteji el área está caracterizada por una topografía más bien difícil, cubierta principalmente por bosque de coníferas (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*), con áreas pequeñas de arbusto y áreas cultivadas. Hay un grado alto de conformidad entre nuestra estimación de área de incendio, 5040 hectáreas, y los datos de campo, 4551 hectáreas, con una discrepancia del 11%. En el caso de Lijar el incendio afectó principalmente a zonas de arbusto, pastizal y una pequeña proporción de arbolado. Tal y como figura en la información de campo, hay varias áreas dentro del contorno que no se han quemado. Al aplicar nuestro algoritmo hemos encontrado varios zonas sin quemar dentro del contorno obtenido por observaciones de campo. El contorno total del incendio afectó a un área de 8160 hectáreas, según se obtiene de nuestro algoritmo, mientras que las estimaciones de los observadores de campo son de 7459 hectáreas, lo cual representa una diferencia del 9%. Finalmente, hemos aplicado el algoritmo a un incendio que afectó a un bosque de coníferas (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*) en el área de Monda. La información de campo obtenida sobre este incendio incluye un parte diario del área afectada por el fuego. Así, este incendio proporciona una prueba apropiada de las posibilidades de nuestro algoritmo para detectar y seguir la evolución de un incendio. Obtenemos un buen acuerdo sobre la evolución del incendio que se complementa con el acuerdo en la estimación final del área afectada por el incendio. Como en los otros casos, se detectan dentro del contorno del incendio algunos pixel sin quemar, lo cual está de acuerdo con las observaciones de campo. Por otra parte, debido al tamaño pequeño de este incendio, la diferencia entre la técnica de campo,

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CORRELACION ENTRE LA MASA TOTAL DEL AEROSOL ATMOSFERICO Y SU ESPESOR OPTICO. APLICACION A LA ESTIMACION DE AEROSOLES MEDIANTE SATELITE.

Victoria E. Cachorro, Didier Tanré\*

*"Grupo de Optica Atmosférica"*

*Departamento de Física Aplicada I  
ITAGRA, Instituto Tecnológico Agrario y Alimentario.  
ETSI Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.*

*(\*Laboratoire d'Optique Atmospherique, LOA  
Université de Lille-1. Villeneuve d'Asq. France*

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es establecer una correlación entre la masa total de aerosoles sobre la vertical y su espesor óptico a una longitud de onda dada (concretamente aquí se ha determinado para la longitud de onda de  $0.55 \mu\text{m}$  y  $1.04 \mu\text{m}$ ) con el fin de estimar dicho contenido mediante técnicas fotométricas a nivel de suelo y mediante satélite. Este estudio se ha realizado sobre aerosoles desérticos por ser estos los que dan lugar al transporte de grandes cantidades de polvo sobre extensas áreas del globo. Para ello se hace uso de medidas fotométricas del espesor óptico en 7 longitudes de onda llevada a cabo en un área desértica en Senegal. La correlaciones obtenidas suponen una mejora sobre la relación de simple proporcionalidad usada por otros autores. Un estudio de los errores asociados a la estimación de la masa del aerosol por esta correlación frente al método de inversión (más correcto) se sitúan entre un 8% y 15% pero la utilización del método de simple proporcionalidad muestra que este alcanza errores del 40%.

## INTRODUCCION

Si el espesor óptico de aerosoles a una determinada longitud de onda  $\tau_a(\lambda)$  (generalmente se utiliza el valor de  $0.55 \mu\text{m}$ ) es una medida de la turbiedad de la atmósfera y por tanto nos da idea de la cantidad de aerosol presente en la misma, parece bastante evidente la existencia de una correlación entre la magnitud que mide la carga total sobre la vertical (masa o volumen total en la vertical atmosférica) y ese espesor óptico. Así encontramos en la bibliografía una correlación lineal del tipo  $M = cte\tau_a(\lambda = 0.55 \mu\text{m})$  con valores muy variables de

esa constante: Volz [1] da un valor de 1.3, Carlson y Caverly [2] 1.5 y 3.75. Más recientemente Dulac et al., [3] dan un valor de 1.13 para aerosoles desérticos detectados sobre el mediterráneo. Ahora bien, conocer la masa o volumen total sobre la vertical atmosférica presupone conocer la función de distribución efectiva o columnar del aerosol atmosférico y para ello debemos no solo conocer el espesor óptico a una longitud de onda sino en una amplia región espectral, o lo que es igual en una serie de longitudes de onda discretas en él. Describiremos pues el método seguido para determinar la masa total del aerosol, basado en medidas experimentales con un fotómetro solar realizadas en una zona desértica de Dakar (Senegal) en Africa y a continuación estableceremos la posible correlación entre ambas magnitudes. El objetivo final del trabajo es pues disponer de una correlación para estimar la masa de aerosoles de tipo desértico conocido el espesor óptico de aerosoles a una determinada longitud de onda. Su aplicación a la estimación de la masa de aerosol mediante satélites esta basada en determinar primeramente el propio espesor óptico mediante satélite, lo cual es en si una metodología bien establecida para el caso del océano [4-6] pero en proceso de desarrollo y validación sobre tierra [7-8]. Sin embargo no vamos a entrar aquí en ese problema colateral con él, pero de importancia vital en el tema de correcciones atmosféricas.

## MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las medidas experimentales fueron realizadas en Mbour ( $16.9^\circ \text{W}$ ,  $14.3^\circ \text{N}$ ), 87 km al sur de Dakar, Senegal (Africa) por el laboratorio de Optica

2640 hectáreas, y nuestro algoritmo, 3220 hectáreas, es del orden del 20%.

## CONCLUSIONES

Hemos propuesto una técnica multispectral que hace uso de los canales 3 y 4 del AVHRR para identificar incendios y estimar su tamaño. La aplicación multitemporal de esta técnica permite seguir el crecimiento del incendio. En el presente trabajo la técnica se prueba con imágenes diurnas, aunque sus procedimientos básicos puedan aplicarse a escenas nocturnas. El método propuesto proporciona una evaluación rápida del área afectada por el incendio, reteniendo la señal provocada por el incendio pero suprimiendo la señal térmica ambigua producida por el terreno baldío.

La técnica multitemporal diferencial, que obtiene el crecimiento imagen a imagen, es una herramienta útil para estudiar los incendios que duran un periodo de 24 horas o más. Puede distinguir incendios que experimentan poco o ningún crecimiento de aquellos que crecen y se mueven rápidamente. Puede identificar también incendios que han comenzado o terminado en las 24 horas anteriores. La comparación entre las técnicas de campo y las técnicas de teledetección muestran que el tamaño del área quemada se estima apropiadamente.

Hemos probado la capacidad de visualizar la evolución del incendio durante el día, mediante la selección apropiada del umbral. Por otra parte la técnica trata de ser aplicable no solamente a áreas forestales, caracterizadas por una baja reflectancia en la región del canal 3. Nuestra técnica se aplica a las áreas cubiertas por arbustos, pastizal y zonas cultivadas de árboles frutales con zonas de suelo baldío, que puede presentar reflectancias altas en el canal 3, especialmente durante el verano, la temporada de mayor riesgo de incendio en nuestra zona Mediterránea.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la CICYT a través del proyecto CLI-95-1840 y a la información de campo proporcionada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

## REFERENCIAS

Burgan, R.E., and Rothermel, R.C. (1984), BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system, Fuel Systems, USDA Forest Service, Ogden, Utah.

Ceccato, S.P., Flasse, S.P., and Downey, I.D. (1995), Fire detection with AVHRR: A useful

contextual algorithm, Proceeding "The meteorological data users' Conference", Winchester, UK.

Chuvieco, E. and Martín, M.P. (1994a), Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images, Photogramm. Eng. Remote Sens. 60: 563-570.

Chuvieco, E. and Martín, M.P. (1994b), A simple method for fire growth monitoring using AVHRR channel 3 data, Int. J. Remote Sens. 15: 3141-3146.

Coakley, A.C. Jr., Bernstein, R.A., and Darker, P.A. (1987), Effect of ship-stack effluents on cloud reflectivity, Science 237: 1020-1022.

Derrien, M., Farki, B., Harang, L., LeGléau, H., Noyalet, A., Pochic, D., and Sairouni, A. (1993), Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery, Remote Sens. Environ. 46: 246-267.

Dozier, J. (1981), A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution, Remote Sens. Environ. 11: 221-229.

Flannigan, M.D. and Von der Haar, T.H. (1986), Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR, Can. J. For. Res. 16: 975-982.

Illera, P., Fernández, A. and Delgado J.A. (1995), Fire monitoring in Spain using NOAA thermal data and NDVI, Sensors and environmental applications of remote sensing, Asknc (ed.), pp. 377-383.

Kennedy, P.J., Belward, A.S., and Grégoire, J.M. (1994), An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data, Int. J. Remote Sens. 15: 2235-2255.

Langaas, S. (1992), Temporal and spatial distribution of savanna fires in Senegal and The Gambia, West Africa, 1989-90, derived from multi-temporal AVHRR night images, Int. J. Wildland Fire 2: 21-36.

Lee, T.F., and Tag, P.M. (1990), Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7 micron channel, Bull. Amer. Meteor. Soc. 71: 1722-1730.

Llvelyn-Jones, D.T., Minnett, P.J., Saunders, R.W., and Zavody, A.M. (1984), Satellite multispectral infrared measurements of sea surface temperature of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2, Q.J.R. Meteorol. Soc. 110: 613-631.

Matson, M., and Dozier, J. (1981), Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor, Photogramm. Eng. Remote Sens. 47: 1311-1318.

Saunders, R.W., and Kriebel, K.T. (1983), An improvement method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data, Int. J. Remote Sens. 9: 123-150.

Vasconcelos, M.J., and Guertin, D.P. (1992), FIREMAP-Simulation of fire growth with a Geographic Information System, Int. J. Wildland Fire 2: 87-96.

Atmosférica de la Universidad de Lille-1 (Francia) durante los meses de abril y mayo de 1986 y 1987. Se utilizó un fotómetro espectral que mide en 7 longitudes de onda discretas (0.45, 0.55, 0.65, 0.85, 1.04, 1.6 y 2.2  $\mu\text{m}$ ). Las medidas al ser de tipo manual no seguían una secuencia predefinida durante el día, es por ello que una vez procesados los datos y a pesar de la variación diaria que presenta el espesor óptico de aerosoles se optó por trabajar con un valor medio diario dado el objetivo de nuestro trabajo. El procesado de datos mostró únicamente 15 días validos durante la campaña del 86 y otros 15 de la campaña del 87. La figura 1 muestra la variación del espesor óptico diario a la longitud de onda de 0,55  $\mu\text{m}$  medida durante ambas campañas, donde puede apreciarse la magnitud de los valores alcanzados, en muchos casos por encima de 2.

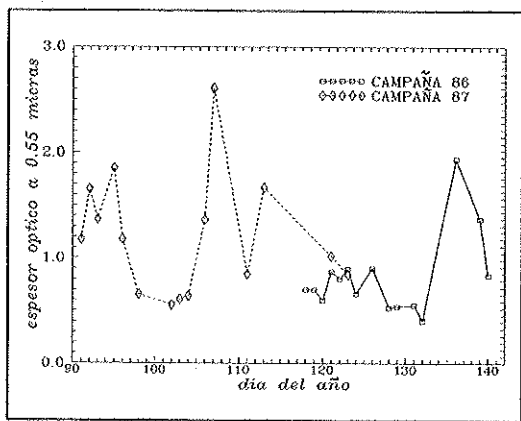


Figura 1. Evolución del espesor óptico diario de los aerosoles desérticos a la longitud de onda de 0.66  $\mu\text{m}$  para las dos campañas de medida.

### METODO

El método seguido para determinar la función de distribución de tamaños de los aerosoles atmosféricos, representativa de la columna atmosférica vertical  $\eta_c(r)$ , conocido el espesor óptico de aerosoles a varias longitudes de onda  $\tau_a(\lambda)$  esta basado en la expresión

$$\tau_a(\lambda) = N_c \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(n, x) \eta_c(r) dr \quad (1)$$

En esta expresión  $\eta_c(r)$  puede determinarse por un proceso de inversión puro [9-10] ó bien mediante un

proceso de minimización entre los valores experimentales y los teóricos, presuponiendo una función  $\eta_c(r)$  ya conocida como puede ser una función de tipo lognormal y determinando los parámetros que la definen. Este es el procedimiento que nosotros hemos seguido aquí [10-11]. En la expresión anterior  $Q_e(m, r)$  es el factor de eficiencia dado por la teoría de "scattering" de Mie, que depende del radio de la partícula y de su índice de refracción. Se ha tomado como valor de referencia para los aerosoles desérticos el valor de  $1.5 + 0.005$  [12]. Una vez determinado la función columnar  $\eta_c(r)$  del aerosol su masa total  $M$  sobre la vertical (gr.  $\text{cm}^{-2}$ ) se determina de acuerdo a

$$M = \rho \frac{4}{3} \pi N_c \int_{r_1}^{r_2} r^3 \eta_c(r) dr \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad media tomada para los aerosoles desérticos igual a  $2.6 \text{ gr. cm}^{-3}$ .

### RESULTADOS

#### a) Evolución de los parámetros del aerosol desértico

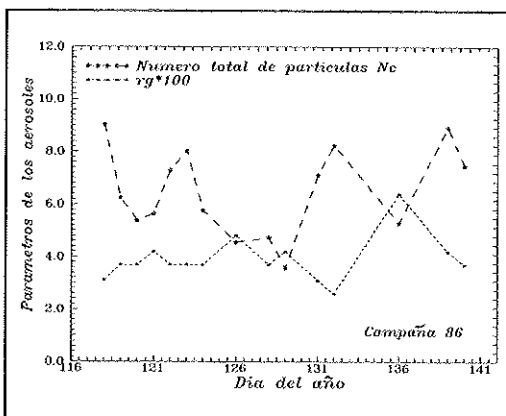


Figura 2. Evolución de los parámetros que definen al aerosol desértico para la campaña del año 86.

En la figura 2 pueden verse los valores obtenidos de los parámetros que definen la granulometría de los aerosoles desérticos mediante la función lognormal, para la campaña del 86: el radio geométrico y la cantidad de partículas sobre la vertical, ya que la desviación standard de esa función se fijó en un valor 3 después de varias pruebas a fin de jugar solo

con un parámetro en el proceso de minimización.

*b) Correlación entre la masa total y el espesor óptico.*

En la figura 3 pueden verse las correlaciones de tipo potencial establecidas para el año 86 y 87 entre la masa total del aerosol y el espesor óptico a la longitud de onda de 0.55  $\mu\text{m}$  (figura a) y 1.04  $\mu\text{m}$  (figura b).

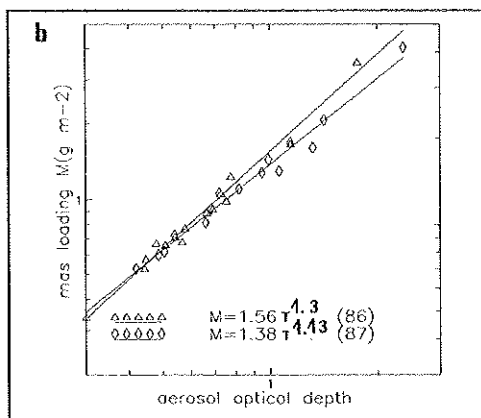
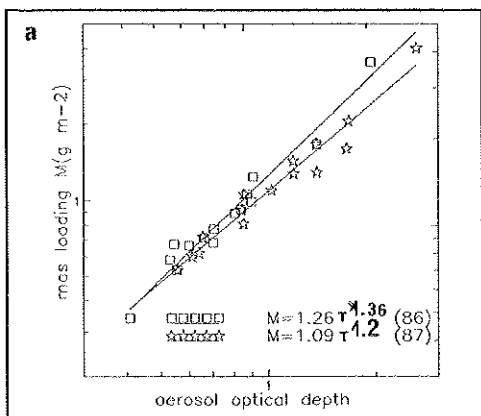


Figura 3. Correlación entre la masa del aerosol y espesor óptico para  $\lambda$  igual a a) 0.55  $\mu\text{m}$ , b) 1.04  $\mu\text{m}$ .

*c) Comparación de las estimaciones de la masa total del aerosol*

En la figura 4 se muestran los valores obtenidos para la masa total del aerosol para la campaña del año 87 de acuerdo al método de minimización así como las estimaciones obtenidas según la correlación establecida y la expresión de simple proporcionalidad

(donde se dedujo para nuestras medida el valor de la constante correspondiente) para las dos longitudes de onda de trabajo 0.55 y 1.04  $\mu\text{m}$ . Aunque observamos una gran similitud entre los valores obtenidos la figura 5 muestra que dichas diferencias no son despreciables.

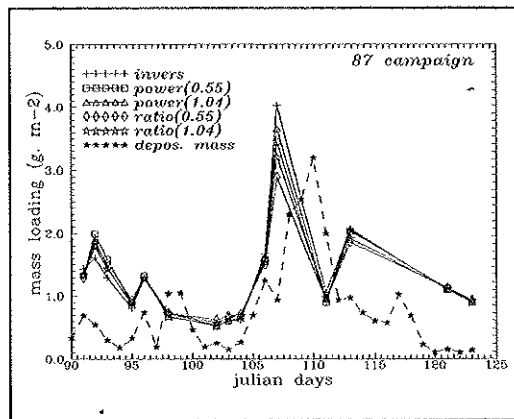


Figura 4. Evolución para la campaña del 87 de las estimaciones de la masa total de aerosol para los tres procedimientos descritos junto con la masa diaria depositada a nivel de suelo.

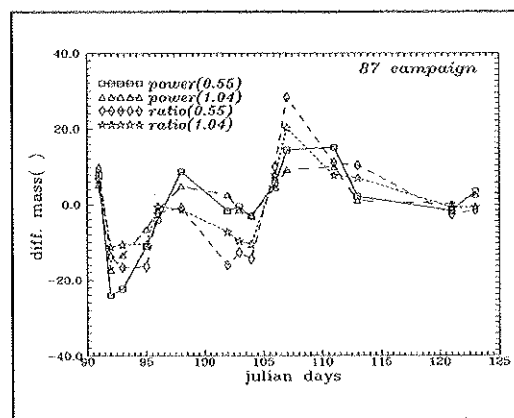


Figura 5. Diferencias relativas de las estimaciones de la masa del aerosol respecto del método de inversión de las dadas por la correlación potencial y lineal para el año 87.

Esta figura 5 nos da las diferencias relativas obtenidas respecto del método de inversión de las estimaciones de la masa del aerosol dadas por nuestra correlación potencial y la de simple proporcionalidad correspondientes a la figura

anterior. Estas diferencias oscilan entre un 20 y 40(%) (año 86) dando tanto subestimaciones como sobrevaloraciones. En la figura 4 se muestra también el valor diario medido de la masa depositada, el cual muestra un comportamiento similar pero con un cierto desfase, así como valores mucho menores pues en general estos valores no son comparables entre sí. Aunque observamos que las correlaciones obtenidas para el año 86 y 87 (para las dos longitudes de onda de trabajo) no son muy distintas sin embargo sus diferencias muestran la dificultad de obtener expresiones con carácter general debido a la gran variabilidad de las características de los aerosoles, aunque aquí estemos estudiando un tipo de aerosol bastante definido. Un estudio teórico llevado a cabo por nosotros [11,12] muestra que a pesar de la variación de la relación  $M/\tau_a$  según el tipo de granulometría del aerosol es posible establecer correlaciones del tipo anterior, pero donde es preciso a su vez conocer el error ligado a dichas estimaciones.

## CONCLUSIONES

Aunque sin restar el carácter puntual que este tipo de correlación puede tener, el estudio realizado sobre una zona de Africa es representativa de los aerosoles desérticos y nuestros resultados están en acuerdo con los obtenidos por otros autores. Actualmente la determinación del espesor óptico de aerosoles para una longitud de onda dada mediante las medidas de radiancia del satélite  $L_{sat}$  para áreas de mar y océano está bien desarrollada. La determinación previa de este parámetro y la utilización de la correlación que vamos a establecer permite estimar la masa de aerosol mediante las técnicas de teledetección. Los nuevos sensores multispectrales como MODIS-EOS, MERIS en Envisat, MOS-PRIRODA, etc. permiten ya una determinación muy factible del espesor óptico e incluso la propia determinación de la función de distribución de tamaño del aerosol al disponer de un gran número de canales de pequeña anchura espectral.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Volz, F., (1970), Spectral skylight and solar radiance measurements in the Caribbean: Marine and Saharan dust, *J. Atmos. Sci.*, **27**: 1041-1047.  
 [2] Carlson, T.N. and Caverly, R.S. 1977. Radiative characteristics of Saharan dust at solar wavelengths, *J. Geophys. Res.*, **82**, 3141-3151.  
 [3] Dulac, F., Tanré, D., Bergametti, G., Duat-

Menard, P., Desbois, M., and Sutton, D. (1992), Assessment of the African airborne dust mass over the western Mediterranean sea using Meteosat data, *J. Geophys. Res.* **97**: (D2), 2248-2506.  
 [4] Rao, C.R.N., Mauda, K. Takashima, T., and Stowe, L.L. 1989, Remote sensing of aerosol over oceans from satellites, "IRS 88: Current Problem in Atmospheric Radiation". Lenoble J. and Geleyn J.F. (Ed.). A Deepak Publishing Hampton, Virginia.  
 [5] Deuzé, J.L., Devaux, C., Herman, M., Santer, R., and Tanré, D. 1988, Saharan aerosols over the south of France: Characterization derived from satellite data and ground based measurements, *J. Appl. Meteorol.* **27**: 680-686.  
 [6] Jankoviak, I. and Tanré, D. 1992. Satellite climatology of saharan dust outbreaks: Method and preliminary results, *J. Climate* **5**, 646-656.  
 [7] Tanré, D., Deschamps, P.Y., Devaux, C., and Herman, M. 1988, Estimation of the Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data, *J. Geophys. Res.*, **83**: 15995-15964.  
 [8] Sendra and Kaufman Y.J. & Sendra, A, 1988, Algorithm for atmospheric correction of visible and near infrared satellite imagery. *Int. J. of Remote Sensing* **9**, 1357-1381.  
 [9] King, M.V., Byrne, D.M., Herman, B.M. and Reagan, J.A. 1978, Aerosol size distribution obtained by inversión of spectral optical depth measurements, *J. Atmos. Sci.* **35**, 2153-2167.  
 [10] Cachorro, V.E., and De Frutos, A.M. 1994, Retrieval of the atmospheric aerosol characteristics from visible extinction data at Valladolid (Spain), *Atmos. Environ.* **28**, 963-971.  
 [11] Cachorro, V.E. & Tanré, D. 1995. Particle mass estimations from extinction data: Applications to satellite determination. In *Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere II*, D.K. Lynch Ed., SPIE Vol 2311, 71-82.  
 [12] Patterson, E.M., Gillette, D., and Stockton, B.H. 1977. Complex index of refraction between 300 and 700 nm for Saharan aerosols, *J. Geophys. Res.* **82**, 3153-3160.  
 [13] Cachorro V.E. and De Frutos, A.M. 1997. An analytical study about the ratio between particle mass loading and extinction: Application to desert dust aerosols. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **57**, 559-568.