

APLICACION DE LAS IMAGENES DIGITALES PROCEDENTES DE LOS SATELITES METEOROLOGICOS CIRCUMPOLARES EN LA DETECCION DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

S. LÓPEZ SORIA¹, F. GONZÁLEZ ALONSO¹ y J. M. CUEVAS¹

RESUMEN

El objetivo fundamental de este estudio ha sido evaluar la potencialidad de las imágenes de baja resolución espacial y alta resolución temporal, como las proporcionadas por el sensor AVHRR del satélite NOAA-9, en la caracterización del estado fisiológico de las cubiertas vegetales a lo largo del año y en la determinación del lugar y la fecha en que dichas cubiertas pueden ser más susceptibles a la aparición y desarrollo de un incendio forestal. Como área en estudio se ha utilizado el Este de la Península Ibérica, donde en 1987 se produjo el mayor incendio forestal en España de dicho año.

(Palabras clave: Riesgo de incendios forestales, imágenes AVHRR-NOAA.)

INTRODUCCION

Los incendios forestales en España

Los incendios forestales constituyen, dentro de la región mediterránea, un agente de alteración medioambiental de enorme importancia, ya que por su elevada frecuencia y fuerte intensidad se ven afectadas grandes extensiones de territorio.

Según indica VÉLEZ (1988a), la situación de los incendios forestales en el área mediterránea a lo largo de la última década se podría resumir, en lo que concierne a los incendios en sí, por el incremento generalizado del número de incendios y los daños crecientes con cifras récord, y en lo que se refiere a la defensa contra los incendios por el aumento de la toma de conciencia sobre la gravedad del problema y el incremento de los medios de extinción en la mayor parte de los países.

Es decir, se conoce mejor el fenómeno de los incendios forestales y se han incrementado los medios de lucha, pero los resultados no han sido muy brillantes, puesto que cada vez hay más incendios que provocan mayores daños.

Entre las causas principales que favorecen la aparición de los incendios forestales en el área medi-

terránea se pueden citar las siguientes: abundancia muy grande de especies forestales con un elevado contenido de resinas y/o aceites esenciales altamente combustibles en verano (ejemplo: *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus nigra* Arn., etcétera); existencia de veranos secos y prolongados y temperaturas superiores a los 30° C durante al menos dos meses en extensas regiones; presencia de vientos terrales de verano, que tienen gran velocidad y poder desecante, lo cual hace descender la humedad atmosférica por debajo del 30% y contribuye a propagar el fuego, trasladando pavesas a gran distancia; gran protagonismo del hombre en la iniciación de los incendios, bien sea por negligencia, descuido o intencionalidad, debido a la elevada densidad de población en las áreas turísticas, especialmente en verano, y la existencia de grandes superficies de plantaciones monoespecíficas de coníferas en zonas con clima muy seco durante el verano.

En España los incendios forestales constituyen uno de los mayores problemas ecológicos y medioambientales, debido a la extensión, frecuencia e intensidad que han adquirido en la última década. España es el país, dentro de la cuenca mediterránea, que tiene una mayor superficie forestal quemada anualmente. Así, en el período 1980-1984 la superficie total quemada en España fue, aproximadamente, 1.000.000 de hectáreas, de las que 410.000 correspondieron a masas arboladas. En el año 1985, especialmente malo bajo estos aspectos,

¹ Sección de Teledetección. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Aprdo. 8111. 28080 Madrid.

el número de incendios fue 13.000 y la superficie total afectada fue 500.000 ha.

Si los daños económicos que sufrió el país durante el período 1980-1984 fueron enormes (del orden de 25.000 millones de pesetas), mucho más graves y difíciles de cuantificar fueron los daños ecológicos, al eliminarse la beneficiosa acción que ofrece el bosque en la protección del suelo, prevención de la erosión, regulación del régimen hidrológico, defensa de embalses, etcétera. A lo anterior es preciso añadir la lamentable pérdida de vidas humanas en tareas de extinción y, como consecuencia, de las inundaciones producidas al no existir cubierta vegetal.

Del análisis estadístico de los datos relativos a incendios forestales desde el año 1961 (PRIETO, 1987) se deduce que la mayor parte de los parámetros relativos a los mismos, tales como número de incendios totales, número de incendios mayores de 500 ha, superficie total quemada, número de horas de duración de los incendios, etcétera, se ha incrementado desde dicho año y, desgraciadamente, la tendencia actual parece que es a aumentar.

Uno de los instrumentos esenciales de cara a la eliminación de los incendios forestales es la predicción del peligro en el tiempo y en el espacio. Según VÉLEZ (1988b), la predicción de los incendios forestales exige contestar a las siguientes preguntas con un margen aceptable de error: ¿Cuándo se producirán? ¿Dónde se producirán? ¿Cómo se desarrollarán?

Los índices de predicción del peligro de incendio forestal deben describir la situación de los dos componentes principales de peligro: el estado de los combustibles forestales y el riesgo o probabilidad de que un incendio se inicie como consecuencia del nivel de actividad de los agentes causantes.

La Teledetección y los incendios forestales

El estudio de los incendios forestales mediante técnicas de Teledetección a partir de imágenes digitales de alta resolución espacial, como las proporcionadas por los sensores MSS (resolución de 80 m) y TM (resolución de 30 m) de los satélites Landsat y el sensor HVR (resolución de 20 m) del satélite SPOT, ha proporcionado buenos resultados

en los aspectos que conciernen a la delimitación del perímetro del incendio y a la evaluación precisa de las superficies realmente afectadas y no solamente recorridas por las llamas.

Siguiendo ese enfoque, se han realizado numerosas experiencias en Canadá y Estados Unidos. Dentro del área mediterránea se ha efectuado una cartografía completa de los incendios forestales con extensión superior a 10 ha ocurridos en territorio francés (HUSSON, 1980).

En España han sido varias las experiencias realizadas, habiéndose estudiado las alteraciones microclimáticas producidas por los incendios en la región valenciana (LÓPEZ GARCÍA *et al.*, 1985) y la localización y cuantificación de las áreas forestales devastadas por los incendios forestales en Cataluña durante el año 1984 (ARBIOL *et al.*, 1985), obteniéndose resultados francamente alentadores. Ahora bien, las fuertes limitaciones que presentan los satélites de las series Landsat y SPOT, desde el punto de vista de la adquisición de imágenes libres de nubes durante períodos de tiempo relativamente largos, unido a su moderada cobertura espacial, elemento de gran importancia cuando se trata de abordar proyectos de alcance regional o nacional, han animado a los investigadores, muy recientemente, hacia la utilización de las imágenes procedentes de los satélites meteorológicos de la serie NOAA.

Los satélites NOAA

Los satélites operacionales de la serie NOAA (inicialmente denominados TIROS-N en su fase de prototipo) se encuentran en órbita desde octubre de 1978, indicándose sus principales características en la Tabla D).

La configuración completa del sistema NOAA consiste en dos satélites que tienen una órbita casi polar y que son complementarias, así, uno de ellos cruza el ecuador a las 07,30 y 19,30 y el otro a las 02,30 y 14,30. Por convención, los satélites de número par cubren la órbita de la mañana (07,30) y los de número impar cubren la órbita de la tarde (14,30). Actualmente estos satélites son el NOAA-10 y el NOAA-9, respectivamente.

Debido a sus características orbitales, y dado que existen dos satélites en operación, se tiene la po-

TABLA I
CARACTERISTICAS DE LOS SATELITES NOAA

Satélite	Período de operación
TIROS-N	19 de octubre de 1978 a 30 de enero de 1980.
NOAA-6	27 de junio de 1979 a 30 de junio de 1986.
NOAA-7	24 de agosto de 1981 a 11 de enero de 1985.
NOAA-8	3 de mayo de 1983 a 6 de marzo de 1986.
NOAA-9	25 de febrero de 1985 a la actualidad.
NOAA-10	20 de septiembre de 1986 a la actualidad.

Principales instrumentos de a bordo:

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR).

TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS).

Tipo de órbita: circular, casi polar, síncrona con el sol.

Semieje mayor: 7.231 km.

Altitud nominal: 853 km.

Angulo de inclinación: 98,8°.

Período orbital: 101-102 minutos.

Hora de paso por el ecuador:

	Satélites pares	Satélites impares
Nodo ascendente	19:30	14:30
Nodo descendente	07:30	02:30

sibilidad de cubrir cualquier punto del ecuador dos veces durante el día y dos veces durante la noche. En latitudes medias, como las de España, el grado de cobertura antes mencionado es, aproximadamente, el doble.

Los satélites de la serie NOAA se diseñaron inicialmente para aplicaciones meteorológicas, llevando como instrumentos principales a bordo el TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) y el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Actualmente el sensor AVHRR posee un canal en el visible, uno en el infrarrojo próximo y tres canales en el infrarrojo térmico, cuyas principales características se especifican en la Tabla II.

La forma más frecuente de utilizar sus datos es por recepción directa, en las estaciones de tierra, de las imágenes digitales en resolución completa, en formato HRPT (High Resolution Picture Transmission).

Desde julio de 1986, y desde diciembre de 1988 en el caso del satélite NOAA-11, es posible recibir datos de los satélites NOAA-9 y NOAA-10 en formato HRPT en la estación de Maspalomas, situada en la isla de Gran Canaria. Estos datos se distribuyen posteriormente entre la comunidad de

usuarios a través de los NPOC (Puntos Nacionales de Contacto) de la red ESA/Earthnet.

Las imágenes NOAA y los incendios forestales

Como ya se ha dicho previamente, la utilización de las imágenes NOAA-AVHRR para el estudio y seguimiento de los incendios forestales a nivel regional y nacional ha surgido debido a las fuertes limitaciones que presentan las imágenes de los satélites de alta resolución espacial desde el punto de vista de la adquisición de imágenes libres de nubes, y también por su moderada cobertura espacial, lo cual es un serio inconveniente cuando se trata de abordar proyectos operacionales de ámbito estatal.

Entre las principales ventajas que ofrecen las imágenes NOAA-AVHRR desde un punto de vista operacional se pueden citar las siguientes: se cubre todo el territorio nacional en una sola imagen, la resolución espacial de las imágenes AVHRR-HRPT (1,1 km en el nadir) permite integrar de una forma efectiva las variaciones locales y proporcionan una respuesta media que puede ser de gran utilidad en proyectos de carácter nacional o regio-

TABLA II
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR AVHRR

	Características espectrales (en micrómetros)			
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
TIROS-N	0,55-0,90	0,72-1,10	3,55-3,93	10,5-11,5
NOAA-6, 8, 10	0,58-0,68	0,72-1,10	3,55-3,93	10,5-11,5
NOAA-7, 9	0,58-0,68	0,72-1,10	3,55-3,93	10,3-11,3
	Canal 5			
TIROS-N	—			
NOAA-6, 8, 10	—			
NOAA-7, 9	11,5-12,5			

Características del sensor:

Campo de visión total: 110,8° grados (centrado en el nadir).

IFOV: 1,4 mrad.

Píxeles por línea de barrido: 2.048.

Resolución espacial en el nadir: 1,1 km.

Resolución radiométrica: 10 bits (1.024 niveles).

nal, y, finalmente, las imágenes NOAA-AVHRR se pueden adquirir, al menos en teoría, diariamente y su coste de adquisición es razonable.

La aplicación de las imágenes NOAA-AVHRR al estudio, seguimiento y detección de los incendios es relativamente reciente, pudiéndose citar entre los trabajos realizados más relevantes los siguientes: MATSON y DOZIER (1981), MILLER *et al.* (1983), MUIRHEAD y CRACKNELL (1985), MALINGREAU *et al.* (1985), MATSON y HOLBEN (1987a), MATSON y HOLBEN (1987b).

Estos investigadores han basado fundamentalmente su trabajo en la utilización del canal infrarrojo térmico de 3,93 micrómetros del sensor AVHRR, y, en lo que respecta al seguimiento de la cubierta vegetal, en el uso de índices de vegetación deducidos de los canales rojo e infrarrojo cercano del sensor AVHRR, llegando mediante este procedimiento a localizar áreas muy susceptibles a los incendios forestales por contener grandes cantidades de biomasa verde acumulada.

También se ha comprobado la utilidad de los datos AVHRR como indicadores del inicio de la época de incendios a partir de la determinación de la fecha en que comienza la senescencia de la vegetación y los procesos fisiológicos asociados (MILLER *et al.*, 1983).

Los índices de vegetación y las cubiertas vegetales

La metodología seguida en este estudio está basada fundamentalmente en el análisis de los índices de vegetación deducidos de la información radiométrica generada por el sensor AVHRR. Numerosos investigadores han desarrollado técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de las cubiertas vegetales a partir de medidas espectrales. Con objeto de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multispectrales a una sola dimensión, se han definido los denominados Índices de Vegetación, que utilizan fundamentalmente la información de las regiones roja e infrarroja cercana del espectro para deducir características propias de la vegetación, tales como el tipo de cubierta, superficie foliar, estrés y fitomasa (TUCKER, 1979; PERRY *et al.*, 1984).

Existe un acuerdo general, según indica HAYES (1985), acerca de la existencia de varias combinaciones de la reflectancia en el rojo y en el infrarrojo cercano que son válidas para proporcionar informaciones útiles sobre las propiedades bióticas de los vegetales. Las combinaciones más frecuentemente usadas son las siguientes:

Infrared/red ratio:

IR/R

Environmental Vegetation Index (EVI):

$$\text{NIR-IR}$$

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):

$$(\text{NIR-RED})/(\text{NIR} + \text{RED})$$

Transformated Vegetation Index (TVI):

$$(\text{NIR-RED})/(\text{NIR} + \text{RED}) + 0,5$$

Estos índices se han manifestado sensibles a la cantidad de vegetación fotosintéticamente activa que se encuentra presente en la cubierta.

Uno de los índices de vegetación más utilizados es el Índice de Vegetación Normalizado conocido como NDVI. HAYES (1985) indica que el NDVI está muy correlacionado con el índice de superficie foliar, la productividad neta primaria y la biomasa.

El rango de variación del NDVI oscila entre -1 y $+1$. En términos generales, el agua, la nieve y las nubes tienen valores negativos, pues reflejan más radiación roja que infrarroja, y las rocas y el suelo desnudo tienen valores del NDVI próximos a cero, ya que tienen reflectancias similares en ambas longitudes de onda. Solamente la vegetación tiene valores positivos del NDVI, siendo mayores estos valores cuanto mayor es el vigor de la vegetación verde.

Las zonas con valores altos del NDVI corresponden a áreas que contienen grandes cantidades de biomasa verde. La división por la suma de los canales en el cálculo del NDVI normaliza el índice y reduce los efectos debidos a cambios en el color del suelo y en el brillo, así como a variaciones en el nivel de intensidad de la iluminación solar.

La sequía intensa y prolongada determina cambios importantes en la cubierta vegetal, tales como alteraciones en las características reflectantes de las hojas, reducción de la biomasa verde, caída de las hojas, acumulación de restos orgánicos, etcétera. Los daños ocasionados durante las épocas de sequía previas a los incendios y por los incendios propiamente dichos se reflejan en variaciones en el índice de vegetación NDVI. Sin embargo, sin una referencia a un año «normal» es muy difícil decidir sobre el límite del valor del NDVI que indica la existencia de *stress* en la cubierta vegetal ocasionado por la sequía.

Si se realiza la hipótesis de que la senescencia comienza a partir del valor máximo del NDVI, se pueden localizar las áreas más susceptibles a los incendios forestales como aquéllas que han sufrido un descenso más drástico en el NDVI a lo largo de la estación previa a la época de los incendios.

MATERIAL Y METODOS

Descripción del esquema metodológico

La metodología utilizada ha comprendido los siguientes apartados:

- Selección de las imágenes NOAA a partir de los «quick-looks». Deben tenerse en cuenta las limitaciones impuestas por la cubierta nubosa y las debidas a las deformaciones geométricas extremas.
- Extracción de áreas de interés y de puntos de control para el registro geográfico. Se decodificaron sólo las bandas 1 (canal rojo) y 2 (canal infrarrojo cercano).
- Cálculo del NDVI sobre los archivos conteniendo las áreas de interés de las fechas seleccionadas.
- Registro local y remuestreo según la técnica del vecino más próximo. Generación de un archivo multitemporal con los MDVI.
- Cálculo del DRAN (Decremento Relativo Acumulado del NDVI). Esta variable informará sobre la variación del índice de vegetación a lo largo del tiempo y se ha calculado por retículas de 10 y 5 km, a un nivel de información semejante al utilizado en el cálculo de los índices de peligro de incendio forestal en España. El DRAN es la variable que servirá de indicador del estado de las masas vegetales en cuanto a su potencialidad como combustible.
- Generación de imágenes clasificadas del NDVI para cada fecha y de mapas superponibles a escala 1:200.000 del DRAN y del DRAN clasificado por umbrales, para su análisis y comparación con los mapas de cultivos y aprovechamientos, los mapas topográficos, los partes de incendios y los datos meteorológicos, como precipitaciones, temperatura, dirección y velocidad del viento y humedad relativa.

Descripción de la zona en estudio

El área en estudio está situada al Este de la Península Ibérica, cubriendo parte de las provincias de Valencia, Castellón y Teruel. Está comprendida entre los 39° 03' y los 40° 09' de latitud Norte, y entre los 0° 06' y los 0° 55' de longitud Oeste, y tiene una superficie de unos 8.800 km².

La principal razón de escoger esa zona de estudio fue el incendio forestal producido entre el 17 y el 19 de julio de 1987 en los términos municipales de Alcublas, Altura y Marines, que fue el mayor incendio forestal en España durante ese año, devastando 3.600 ha, de las cuales 2.810 correspondieron a monte arbolado. La especie arbórea predominante en los terrenos afectados por el incendio era el *Pinus halepensis* Mill.

El incendio comenzó por un negligente uso del fuego en labores de limpieza de una finca agrícola colindante a uno de los montes quemados. El fuerte viento reinante se encargó de extender el fuego al resto de los 36 km² quemados.

En la zona del incendio el relieve es muy ondulado, siendo muy abundantes las crestas y los barrancos, lo que facilita el avance del fuego, en especial si hay viento de Poniente, muy desecante.

El carácter calizo del terreno y las fuertes pendientes acentúan los efectos perjudiciales del fuego, puesto que al incremento del pH superficial se añade la posibilidad de arrastres provocados por la escorrentía con la pérdida de suelo fértil que ello implica.

El clima en toda la región es mediterráneo seco, existiendo una gran variedad en la cubierta vegetal. Junto a los montes poblados de coníferas, hay grandes superficies dedicadas al cultivo de agrrios, viñedos, olivares y regadíos, cultivándose el arroz de forma intensiva alrededor de la Albufera.

En la Figura 1 aparece la localización geográfica del área en estudio.

Proceso operativo de la aplicación

El proceso operativo de la aplicación aparece, de forma esquemática, en la Figura 2.

Para la selección de las imágenes se consultaron los «quick looks» disponibles en el NPOC de Ma-

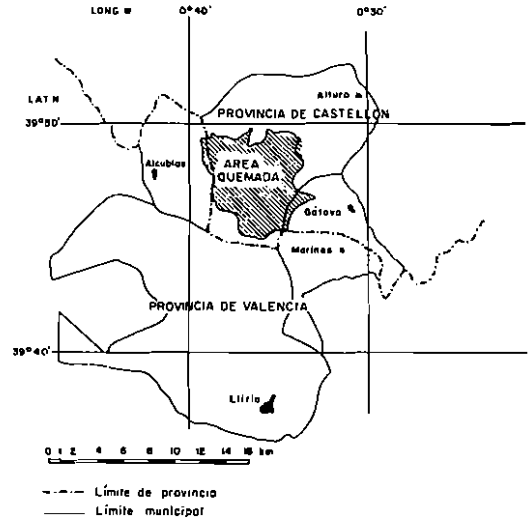


Fig. 1. Localización del área en estudio.

drid, llegándose a la conclusión de que era necesario trasladarse a la Estación Espacial de Maspalomas para consultar el catálogo general de los satélites NOAA-9 y NOAA-10. Se consideró que eran de mayor utilidad las imágenes proporcionadas por el satélite NOAA-9, por las mejores condiciones de iluminación que se dan a la hora de su paso, alrededor de las tres de la tarde.

Dado que la presencia de nubes sobre la Península Ibérica había sido más abundante de lo habitual durante la primavera y el verano de 1987, y que las deformaciones geométricas para esta zona llegan a ser extremas varios días al mes, se seleccionaron sólo seis imágenes dentro del rango de fechas considerado, siendo cinco de ellas anteriores al incendio y una posterior al mismo. Sus fechas fueron las siguientes: 7 de mayo de 1987, 13 de junio de 1987, 23 de junio de 1987, 2 de julio de 1987, 12 de julio de 1987 y 17 de agosto de 1987.

Las imágenes vinieron en la última versión del formato SHARP (Standard Family HRPT Archive Request Product) modificado en mayo de 1987, por lo que fue necesario desarrollar un nuevo *software* que las pudiese decodificar.

Extracción de áreas de interés

El tratamiento de los datos NOAA se realizó fundamentalmente en un ordenador CDC-CYBER

NASPALOMAS (INTA - ESA)



MADRID (INIA): CYBER 838 (MOS2-MOS/VE) Y COMPAQ 386 (MSDOS)

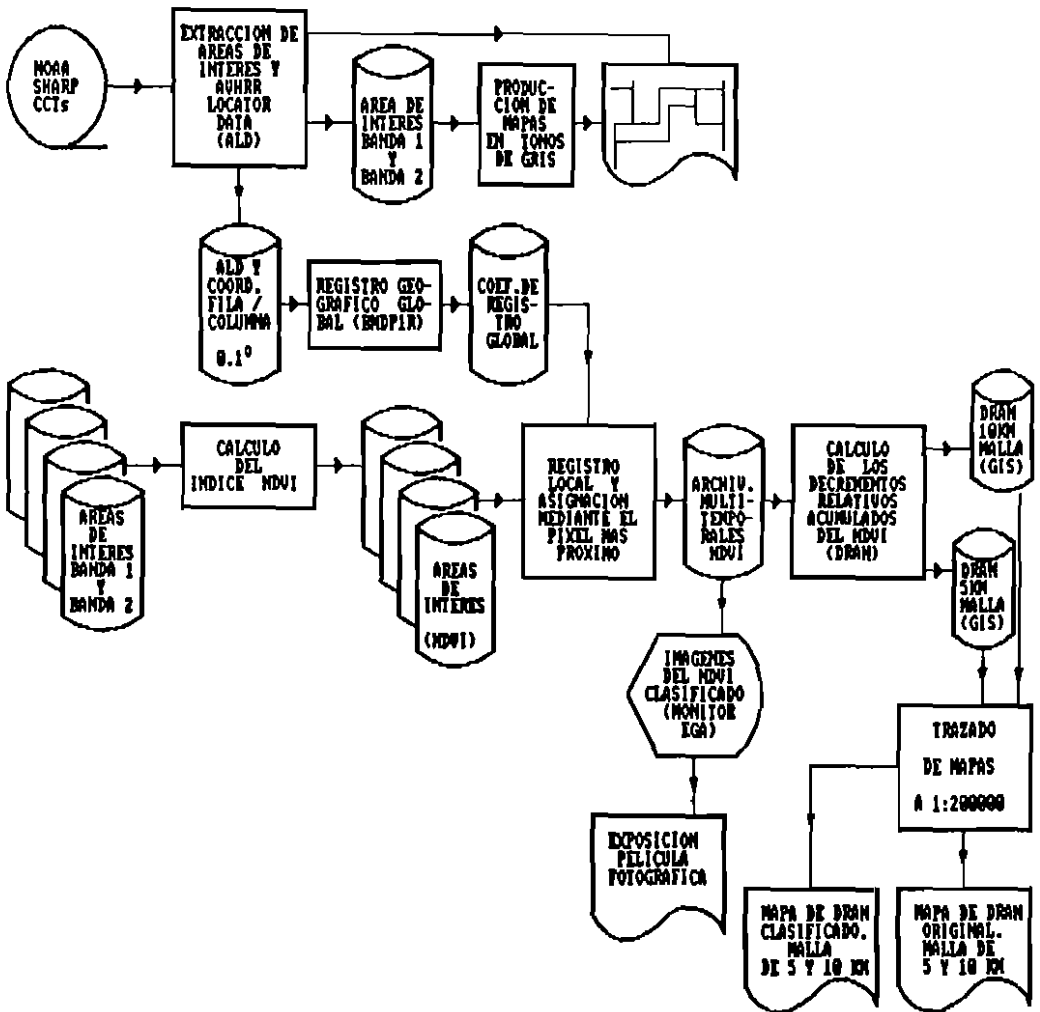


Fig. 2. Esquema de la aplicación informática desarrollada.

830 bajo el sistema operativo NOS2 y se utilizó un compilador FORTRAN V con extensiones CDC. La extracción de las ventanas de trabajo se realizó junto con la de puntos ALD (AVHRR Location Data), obteniéndose mapificaciones de la banda 2. En cada ventana se incluyeron los valores digitales del canal 1 (rojo visible, de 0,55 a 0,68 micrómetros) y del canal 2 (infrarrojo cercano, de 0,725 a 1,1 micrómetros). Sobre los datos del ALD se pasó el programa BMP1R (DIXON, 1975), calculándose los polinomios de ajuste por mínimos cuadrados entre coordenadas fila-columna y latitud-longitud, obteniéndose residuos inferiores a un píxel.

Cálculo del NDVI

Cada una de las ventanas pertenecientes a las imágenes seleccionadas sirvieron de entrada al cálculo de NDVI:

$$\text{NDVI} = (\text{banda 1} - \text{banda 2}) / (\text{banda 1} + \text{banda 2})$$

Se generaron dos tipos de archivos. En el primero de ellos se grabó el valor del NDVI en formato real y en el segundo una asignación de clases por intervalos seleccionados adecuadamente.

El valor máximo del NDVI fue 0,3016, localizado en los arrozales de La Albufera. Para la mapificación y edición en pantalla del NDVI se definieron las clases siguientes:

- Clase 1: de -1,0 a 0,0
- Clase 2: de 0,0 a 0,05
- Clase 3: de 0,05 a 0,10
- Clase 4: de 0,10 a 0,15
- Clase 5: de 0,15 a 0,20
- Clase 6: de 0,20 a 0,25
- Clase 7: de 0,25 a 0,30
- Clase 8: de 0,30 a 1,0

Creación del archivo multitemporal

Para la creación del archivo multitemporal, así como para la posterior comparación con la verdad terreno, era necesario un cuidadoso registro geográfico que tuviera una precisión mayor de un píxel. Para su realización fue preciso corregir las ecuaciones de calibración global, derivadas del ALD, mediante desplazamientos traslacionales calculados por superposición de las escenas registra-

das con dichas ecuaciones. Posteriormente se realizó un muestreo con un intervalo de 0,1° en latitud y longitud, por asignación según el vecino más próximo.

Los archivos con el NDVI clasificado ya registrados se enviaron a un microordenador COMPAQ 386/20, representándose en pantalla las imágenes y fotografiándose la secuencia temporal para un primer análisis visual de la evolución del índice a lo largo del período previo al incendio.

En las Fotos 1 y 2 de la Lámina I aparecen las imágenes del NDVI correspondientes a las distintas fechas. Es posible apreciar en las imágenes que aparecen en estas fotos un notable incremento general del valor del NDVI del 7 de mayo al 13 de junio, correspondiente al desarrollo vegetativo propio de la primavera. A partir del 13 de junio, las sucesivas imágenes muestran un decremento paulatino y general en el valor del NDVI, siendo este efecto especialmente marcado en las imágenes del 12 de julio al 17 de agosto.

Esta apreciación ha sido totalmente confirmada a la vista de la evolución que han seguido las variables meteorológicas durante el período 13 de julio-17 de agosto. En las fechas del inicio y del desarrollo del incendio forestal coincidieron circunstancias tales como vientos del Oeste, cálidos y desecantes, con aumentos progresivos de su velocidad. Cuando la dirección del viento cambió a Levante se produjo la extinción del incendio.

Se puede establecer visualmente una asociación entre las clases del NDVI representadas en las Fotos 1 y 2 de la Lámina I y los usos del suelo presentes en la zona en estudio. Así, los colores verde oliva y marrón oscuro representan a la vegetación natural; los colores verde brillante, a los cítricos y a los regadíos; el blanco brillante, a los arrozales; el rojo a la ciudad de Valencia, a zonas sin ninguna vegetación y al incendio, y el azul al mar.

Cálculo de los decrementos acumulados del NDVI

Con objeto de sintetizar la información contenida en la serie de imágenes NOAA utilizada, se ha diseñado una variable, denominada DRAN (Decremento Relativo Acumulado Normalizado), que resume la variación del NDVI. El decremento rela-

tivo producido en el índice NDVI entre dos fechas, calculado píxel a píxel y totalizado y extendido por cuadrículas de 10 y 5 km, sintetiza al acumularse a lo largo del período estudiado, la evolución que ha seguido el estado fenológico de la cubierta vegetal. Así pues, se ha definido el DRAN como el sumatorio para cada retícula del decremento del NDVI que se ha producido a lo largo del período considerado:

$$\text{DRAN} (N, d_1, d_2, I, J) = \sum_p \text{RND} (N, id_p, id_{h+1}, I, J)$$

Siendo:

id_p la imagen con el NDVI de la fecha h .

d_1, d_2, \dots, d_n las fechas de las imágenes disponibles.

RND el decremento relativo del NDVI:

$$\text{RND} (N, D1, D2, i, j) = \frac{\sum_{l=j}^{j+N} \sum_{k=i}^{i+N} \text{NDVI} (D2, k, l) - \text{NDVI} (D1, k, l)}{\text{NDVI} (D1, k, l)}$$

Donde:

NDVI es el Normalized Difference Vegetation Index.

N es el tamaño de la retícula en píxeles.

D1 es la imagen correspondiente a una fecha dada.

D2 es la imagen de la fecha siguiente disponible.

i es la fila correspondiente del píxel.

j es la columna correspondiente del píxel.

Tanto i como j se incrementan en N en cada retícula.

Una vez que se calcularon los decrementos del NDVI por cuadrículas de 5 y 10 km, los archivos correspondientes se enviaron a un microordenador para su edición mediante *plotter* electrostático en forma de superponibles a escala 1:200.000. Con el fin de facilitar la interpretación de estos resultados se realizó una clasificación equiprobable de los decrementos en tres clases: altos, medios y bajos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Lámina I, Foto 3, se presenta el mapa de decrementos hasta el 12 de julio (fecha anterior al incendio), clasificados en las tres clases indicadas, pudiendo observarse que las cuadrículas donde se produjo el incendio pertenecen a la clase con elevado decremento acumulado, lo cual parece indicar que la cubierta vegetal allí ubicada era altamente susceptible a la declaración o propagación del incendio.

Análogamente, en la Foto 4 de la misma Lámina se presenta el mapa de decrementos hasta el 17 de agosto (fecha posterior al incendio), pudiéndose observar en ella que en dicha fecha una gran parte del área forestal de la zona analizada se encontraba en riesgo elevado de declaración y propagación de un incendio forestal, tal y como normalmente ocurre en las masas de coníferas del Levante español en estas fechas del año.

Las conclusiones extraídas del desarrollo de este estudio son las siguientes:

Se constata que el NDVI refleja la evolución de la fenología de los vegetales. Pudiendo diferenciarse la fenología de agrios, arroz, regadíos intensivos y formaciones vegetales naturales.

Los canales rojo e infrarrojo cercano del sensor AVHRR son sensibles a las variaciones climáticas, detectándolas a través de la reacción de la vegetación frente a las mismas.

La información espectral se puede interpretar mediante el empleo de una variable sintética, el DRAN, que actúa como un indicador de la susceptibilidad de la vegetación en relación a su capacidad de convertirse en combustible durante un incendio forestal, y, en consecuencia, puede funcionar a modo de índice de peligro actualizable periódicamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la obtención de una ayuda de investigación por concurso público convocado en 1987 por la Dirección General del Medio Ambiente del MOPU, para la realización de un estudio de investigación sobre el tema: Aplicaciones de la teledetección para la evaluación de situaciones ambientales. Los autores agradecen la colaboración prestada por el Servicio de Incendios del ICONA, los Servicios Forestales de Castellón y Valencia de la Generalidad Valenciana y la estación espacial de Maspalomas de la Agencia Espacial Europea.

SUMMARY

The main objective of this study has been to evaluate the potentiality of the images of low spatial resolution and high temporal resolution provided by the sensor HVRR of the NOAA-9 satellite in the characterization of the physiological state of the vegetal ground covers along the year and in the determination of the date and place in which these covers are more prone to suffer a forest fire. The study area has been the East of the Iberian Peninsula who suffered the biggest forest fire produced in Spain in the year 1987.

BIBLIOGRAFIA

- ARBIOL, R.; ROMEU, J., y VIÑAS, O., 1985: *Localización y cuantificación de las áreas forestales devastadas por los incendios en Cataluña mediante técnicas de percepción remota*. Proyecto piloto operación 1984 de la Agencia Espacial Europea, Instituto Cartográfico de Cataluña, Barcelona.
- DIXON, W. J., 1975: *BMDP. Biomedical Computer Programs*. University of California Press, Berkeley.
- HAYES, L., 1985: «The current use of TIROS-N series of meteorological satellites for land cover studies». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 6: 35.
- HUSSON, A., 1980: *Teledetection des incendies de forêts en région méditerranéenne*. Les cahiers de l'OPIT. Paris.
- LÓPEZ GARCÍA, J. M.; CASELLES, J., y MELIA, J., 1985: «Following the microclimatic alterations produced by forests fires by means of the LANDSAT 5 (TM) sensor». *3rd Int. Coll. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*. Les Arcs, pp. 16-20, de diciembre.
- MALINGREAU, J. P.; STEVENS, G., y FELLOWS, L., 1985: «The 1982-83 forest fires of Kalimantan and North Borneo. Satellite Observations for Detection and Monitoring». *Ambio*, 14: 314.
- MATSON, K., y DOZIER, J., 1981: «Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor». *Phot. Eng. & Remote Sensing*, 47: 1311.
- MATSON, M., y HOLBEN, B., 1987a: «Satellite detection of tropical burning in Brazil». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 8: 509-516.
- MATSON, M., y HOLBEN, B., 1987b: «Fire detection using data from the NOAA-N satellites». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 8: 961-970.
- MILLER, N.; CHINE, E., y HOWARD, S., 1983: «Evaluation of AVHRR data to develop fire fuels information as an input to IAMS». Final Report. US Geological Survey.
- MUIRHEAD, K., y CRACKNELL, A. P., 1985: «Straw burning over Great Britain detected by AVHRR». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 6: 827.
- PERRY, C. R., y LAUTENSCHLAGER, L. C., 1984: «Functional equivalence of spectral vegetation indices». *Remote Sensing of Environment*, 14: 169-182.
- PRIETO, F., 1987: «25 años de incendios forestales». *Curso de incendios forestales organizado por Greenpeace*. Madrid.
- TOWNSHEND, K. R. G., y JUSTICE, C. O., 1986: «Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 7: 1435.
- TUCKER, C. J., 1979: «Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation». *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- TUCKER, C. J., y SELLERS, P. J., 1986: «Satellite remote sensing of primary production». *Int. Jour. of Remote Sensing*, 7: 1395.
- VÉLEZ, R., 1988a: «Los incendios forestales en los países de la región mediterránea». *Seminario ECE/FAO/OIT sobre prevención de incendios forestales*. Valencia, 1986.
- VÉLEZ, R., 1988b: «Predecir para prevenir. Aplicación de la predicción del peligro de incendios forestales». *Seminario ECE/FAO/OIT sobre prevención de incendios forestales*. Valencia, 1986.