

CARTOGRAFIA Y EVALUACION SUPERFICIAL DE GRANDES INCENDIOS FORESTALES A PARTIR DE IMAGENES DE SATELITE

M. PILAR MARTÍN ISABEL¹ y E. CHUVIECO¹

RESUMEN

En este artículo se evalúan las posibilidades del análisis multitemporal de Índices de Vegetación, obtenidos a partir de imágenes de satélite, para obtener la cartografía y evaluación superficial de incendios forestales. Se presenta un proyecto piloto desarrollado sobre un sector de la costa mediterránea española, afectado por varios incendios de considerable tamaño durante el verano de 1991. Sobre una serie multitemporal de imágenes NOAA-AVHRR se muestran las correcciones radiométricas y geométricas aplicadas, así como el cálculo de los Índices de Vegetación (NDVI). Para discriminar el área quemada se utilizaron diversas técnicas de detección de cambios aplicadas a imágenes anteriores y posteriores a los incendios. La verificación de resultados se llevó a cabo mediante la comparación con las estadísticas del ICONA.

Palabras clave: Teledetección, incendios forestales, cartografía, NOAA-AVHRR.

0. INTRODUCCION

En el mundo mediterráneo el fenómeno de los incendios forestales ha sido, desde siempre, un elemento presente en la naturaleza, desempeñando un importante papel de selección que marcó pautas evolutivas en las comunidades vegetales. Sin embargo, aun cuando los incendios hayan sido un hecho natural, con repercusiones incluso benéficas para el ecosistema forestal, la incontrolada proliferación de los mismos en los últimos años ha contribuido a agravar sus efectos. Ante la magnitud alcanzada por este fenómeno, los distintos gobiernos se han visto en la necesidad de prestarle mayor atención, aumentando los recursos destinados a la lucha contra el fuego y promoviendo acciones encaminadas tanto a la prevención como a la detección y extinción de incendios.

La evaluación rápida de los efectos producidos por el fuego es uno de los problemas a los que deben hacer frente los países con alta incidencia

de incendios forestales. La falta de una localización precisa del perímetro quemado, que en nuestro país sólo se realiza en el caso de los grandes incendios, dificulta notablemente el estudio de la distribución espacial de los factores de riesgo. Además, con frecuencia, los datos referidos a las superficies afectadas por incendios engloban zonas que han ardido varias veces, con lo que las estadísticas suelen incluir una sobreestimación de las áreas quemadas. La falta de estadísticas precisas en cuanto a la superficie afectada, así como de información respecto a la localización exacta del área quemada, impide tener un conocimiento adecuado sobre la incidencia histórica del fuego, dificultando las labores de gestión del territorio en lo que se refiere a la evaluación de sus efectos, así como en la toma de decisiones en cuanto a la recuperación de la zona quemada de cara a evitar procesos erosivos de carácter irreversible.

De todo ello se deriva la necesidad de contar con nuevas herramientas que faciliten una información espacial más detallada y precisa de este fenómeno. En este sentido, el empleo de imágenes de satélite, procedentes de sensores de baja resolu-

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares. Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares.

ción como el NOAA-AVHRR resulta especialmente indicado para la elaboración de una cartografía de grandes incendios, así como para la estimación de área afectada por los mismos.

1. EL EMPLEO DE IMAGENES DE SATELITE EN LA CARTOGRAFIA Y EVALUACION SUPERFICIAL DE AREAS QUEMADAS

En los últimos años, se han comenzado a aplicar nuevas técnicas que permiten una evaluación más certera de las áreas quemadas, tanto desde el punto de vista estadístico como cartográfico. Por ejemplo, los sistemas de posicionamiento por satélite, comúnmente conocidos como GPS (*Global Positioning System*), permiten obtener el perímetro del incendio desde plataformas aéreas o terrestres, mejorando la precisión geométrica de las estimaciones visuales.

La observación de la Tierra que realizan los satélites de teledetección se ha demostrado muy

valiosa para el estudio y la prevención de desastres naturales, como sequías, erupciones volcánicas o inundaciones. También para el caso concreto de los incendios forestales la teledetección ha demostrado ser sumamente útil. La información que aportan las imágenes de satélite sobre regiones del espectro no observables por medios convencionales (infrarrojo cercano, medio y térmico), resulta de gran valor para una evaluación precisa del área quemada (TANAKA *et al.* 1983; CHUVIECO y CONGALTON, 1988), así como del proceso de recuperación de la misma tras el fuego, comparando las situaciones previas y posteriores al suceso (JAKUBAUSKAS *et al.* 1990).

Conviene recordar que cualquier proceso de teledetección se basa en la capacidad de un sensor para recoger la energía electromagnética procedente de los objetos observados. Ello permite caracterizar espectralmente las distintas cubiertas que forman la superficie terrestre. En el caso de las masas vegetales esta caracterización presenta algunas dificultades como consecuencia de

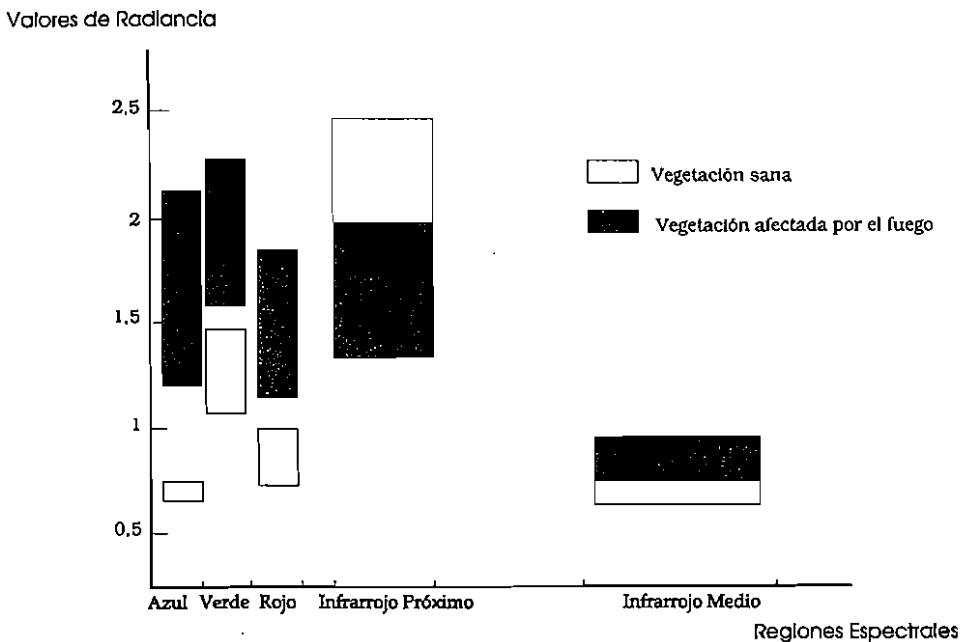


Fig. 1. Comportamiento espectral de la vegetación afectada y no afectada por el fuego.

los múltiples factores que influyen en la señal finalmente detectada por el sensor. A pesar de ello se han establecido una serie de modelos teóricos sobre el comportamiento reflectivo de la vegetación que nos permiten conocer la relación entre las propiedades ópticas de la cubierta vegetal y su estado, lo que facilita la interpretación de la señal codificada por el sensor en la correspondiente imagen.

De acuerdo a esos modelos teóricos, el comportamiento espectral típico de la vegetación vigorosa se caracteriza por una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a $0,55\mu\text{m}$), y una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, que se reduce paulatinamente hacia el infrarrojo medio (Fig. 1). Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos fotosintéticos, la estructura celular de las hojas y el agua que almacena la planta (CHUVIECO, 1990).

Cualquier fuente de estrés en la vegetación se traducirá en un comportamiento espectral más o menos alejado de lo anteriormente expuesto. La hoja quemada pierde buena parte de sus pigmentos, además de dañarse notablemente su estructura celular. En consecuencia, al reducirse el efecto absorbente de esos pigmentos, la reflectividad en las bandas visibles del espectro tiende a ser mayor. Por el contrario, el deterioro de la estructura celular de la hoja causa una reducción de la señal en el infrarrojo cercano (CHUVIECO y CONGALTON, 1988; MALINGREAU, 1990), así como en el infrarrojo medio, a consecuencia de la pérdida de humedad (CHUVIECO y CONGALTON, 1988). Finalmente, la temperatura del área quemada tiende a ser mayor, tanto por la mayor absorción (a consecuencia de su color negro), como por la menor evapotranspiración (LÓPEZ y CASELLES, 1991; HOPE y McDOWELL, 1992). En resumen, la vegetación quemada tiende a presentar una curva más plana que la vegetación sana (Fig. 1), lo que implica mayor riesgo de confusión con clases no vegetales, como zonas urbanas o agua (TANAKA *et al.* 1983).

Pese a ello, se han desarrollado experiencias de gran interés sobre la cartografía de áreas quemadas a partir de la teledetección espacial, utilizando, mayoritariamente, sensores de alta resolución

espacial como Landsat-MSS y Landsat-TM. No obstante, la aplicación a esta temática de imágenes de baja resolución espacial, como los procedentes de la serie de satélites NOAA se ha incrementado notablemente en los últimos años (CHUVIECO y MARTIN, 1994). Esto se explica por las ventajas que este tipo de imágenes ofrecen para el seguimiento de fenómenos dinámicos en el espacio y en el tiempo, como es el caso de los incendios forestales, cuyo estudio requiere disponer de información casi en tiempo real. El sensor AVHRR, a bordo de los satélites NOAA proporciona imágenes digitales sobre 5 bandas del espectro (rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y dos en el térmico) con una resolución en terreno de, aproximadamente, $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, y un ciclo de cobertura de 12 horas, que puede reducirse a 6 al existir en funcionamiento dos satélites de órbitas complementarias que operan sincrónicamente. Estas características le convierten en el sensor actualmente más capacitado para abordar estudios de fenómenos dinámicos a pequeña escala.

La detección y cartografía de incendios con imágenes NOAA se ha basado hasta el momento, casi de forma exclusiva, en la utilización de los canales 3 y 4 (infrarrojo medio y térmico, respectivamente). Su eficacia para esta aplicación se ha demostrado en numerosos estudios, especialmente sobre áreas de difícil acceso, como es el caso de Indonesia (MALINGREAU, 1984), donde se utilizaron imágenes NOAA para estudiar los incendios catastróficos ocurridos en 1983; y Canadá (FLANNIGAN y VONDER HAAR, 1986). En la Amazonía brasileña se han desarrollado también varios proyectos basados en la utilización de los datos procedentes del canal 3 del sensor AVHRR, para estimar el área total afectada anualmente por incendios forestales (SETZER y PEREIRA, 1991). Basándose en los buenos resultados obtenidos en estos estudios, se ha desarrollado un programa operacional para la estimación del área afectada por incendios forestales en el territorio brasileño.

A pesar de que el canal 3 del AVHRR ha demostrado su utilidad para este tipo de aplicaciones, existen varios factores que dificultan la utilización operativa de estas imágenes (ROBINSON, 1991). El propio tamaño del pixel, que condiciona la superficie mínima que debe estar ardiendo

para que el incendio pueda detectarse en la imagen; la baja sensibilidad del canal 3, que se satura a los 47°C y puede originar confusión con suelos recalentados, desprovistos de vegetación; la presencia de nubes, y la hora de adquisición de las imágenes, son algunos de los problemas más destacados.

Aunque la mayoría de los trabajos desarrollados hasta el momento se han centrado en la utilización del infrarrojo medio y térmico, existen algunos estudios de gran interés que demuestran la utilidad del NDVI para realizar una estimación de los efectos del fuego, a partir de estudiar los decrementos de este índice para las imágenes anteriores y posteriores al incendio (MALINGREAU, 1984). En un reciente estudio, llevado a cabo sobre una amplia zona de bosque boreal en el interior de Alaska (KASISCHKE *et al.*, 1993), los resultados obtenidos demostraron la eficacia del análisis multitemporal del NDVI para detectar y cartografiar grandes incendios. Se alcanzaron estimaciones de hasta el 98% en incendios superiores a 5.000 ha.

Con las características propias de nuestro bosque mediterráneo, nosotros realizamos una primera estimación de la idoneidad de las imágenes NOAA para evaluar áreas quemadas (MARTIN y CHUVIECO, 1993), comparando además esta evaluación con sensores de mayor resolución espacial como es el caso del Landsat-TM (MARTIN *et al.*, 1994²).

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es evaluar las posibilidades de la aplicación de imágenes de satélite, y más concretamente, las obtenidas por el sensor NOAA-AVHRR a la cartografía e inventario superficial de grandes incendios forestales. Se trata, ante todo, de ofrecer una alternativa efecti-

va y de bajo coste a los tradicionales métodos de observación y estimación de los efectos del fuego, que pueda ser aplicada en la práctica por los organismos encargados de la gestión forestal como ayuda en las labores de evaluación de daños y recuperación de la zona afectada por el fuego.

Nuestro interés se centra además, en plantear una metodología alternativa a la utilización del canal 3 para la cartografía de incendios, que permita solventar los problemas de aplicación que presenta este tipo de imágenes.

3. METODOLOGIA

3.1. El área de estudio

Situada al este de la Península Ibérica, el área piloto elegida para desarrollar nuestro estudio ocupa un sector de 30.609 km² en el área central de la fachada mediterránea (Fig. 2). Presenta las características típicas de las montañas costeras mediterráneas. La vegetación está compuesta, fundamentalmente, por coscojares en los suelos mejor conservados, y matorrales abiertos en los casos de mayor alteración edáfica. En ambos casos un dosel de pinos, procedente de repoblaciones o regeneraciones tras incendios anteriores, cubre en mayor o menor medida a tomillares y coscojares. Se trata de una zona de relieves abruptos, con pendientes pronunciadas, en algunos casos con valores superiores al 90%, que propician el desarrollo de grandes incendios debido al efecto chimenea que se produce en barrancos y laderas cuando el fuego avanza en sentido ascendente. En cuanto al clima, está muy influenciado por la proximidad del Mediterráneo. En verano, la influencia del anticiclón de las Azores, en su situación septentrional, impide la llegada de las perturbaciones atlánticas, por lo que se produce una fuerte sequía que se ve acentuada por la acción de los vientos de Poniente. Estos vientos llegan a la costa valenciana tras su paso por la recalentada Meseta, provocando un efecto abrasador, en el que las temperaturas pueden llegar a los 40°C, con una bajísima humedad relativa (del 20 al 25%), creando un ambiente propicio para el inicio y desarrollo de grandes incendios. Las actividades humanas ofrecen, asimismo, un alto riesgo, tanto en lo que se refiere al uso agrícola de la tierra, como en las actividades de carácter turístico o recreativo.

² Debido a un error mecanográfico, en este trabajo citado existe una errata en el capítulo de resultados. En la Tabla I aparecen cambiados los datos correspondientes a la estimación con imágenes NOAA de las zonas forestales afectadas en el incendio de Buñol. Así, para los componentes principales donde aparece 18.902 ha, debería aparecer 19.915 ha, mientras que en la regresión debería aparecer 18.902 donde aparece 19.915 ha.

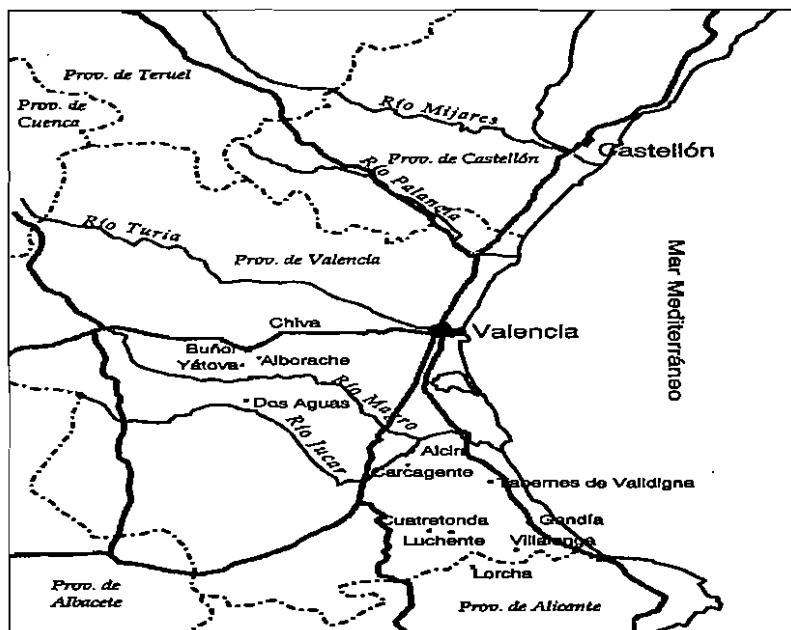


Fig. 2. Localización del área de estudio.

Esta zona, frecuentemente afectada por incendios forestales, sufrió uno de especial importancia en los últimos días del mes de julio de 1991, que arrasó unas 18.000 ha de superficie forestal en la comarca valenciana conocida como Hoya de Buñol. Este incendio tuvo su inicio en la tarde del día 28 de julio como consecuencia de un rayo provocado por una tormenta seca, y se extinguió el 4 de agosto. La confluencia de una serie de circunstancias, tanto de origen natural (fuertes vientos de Poniente), como provocadas por el hombre (aparición simultánea de focos secundarios intencionados), favoreció la propagación del mismo hasta adquirir dimensiones catastróficas.

Otros incendios tuvieron lugar en el sector suroccidental de nuestra zona de estudio durante el mes de julio. Estos focos, aunque de menor

tamaño que el de Buñol, también alcanzaron dimensiones considerables, por lo que tuvimos ocasión de analizarlos a partir de las imágenes de satélite.

3.2. Selección y corrección de las imágenes

Con objeto de disponer de información suficiente de las condiciones anteriores y posteriores a los incendios que se produjeron en nuestra zona de estudio durante el mes de julio de 1991 decidimos utilizar una serie diaria de imágenes NOAA comprendida entre el 10 de julio y el 10 de agosto de 1991. De todas las imágenes disponibles descartamos, siempre que nos fue posible, aquellas que presentaban abundante cobertura nubosa o deformaciones geométricas extremas en la zona de interés. Asimismo, al seleccionar las imágenes,

intentamos elegir aquéllas que presentasen mejores condiciones de iluminación, es decir, las captadas por el sensor en las horas centrales del día (14,30 aproximadamente). De esta forma se limitó la selección a las imágenes adquiridas por el satélite NOAA-11, pues la hora de paso del NOAA-9 resultaba ya bastante degradada, retrasándose tres horas sobre el paso inicial. Esto nos permitió conseguir una cierta homogeneidad en la serie, disminuyendo, en lo posible, las diferencias entre imágenes debidas a las características del sensor y las condiciones de iluminación.

Finalmente se seleccionaron un total de 15 imágenes, que abarcan el período comprendido entre el 10 de julio y el 8 de agosto de 1991. Esta serie resulta bastante consistente para los días 10 al 13 y 26 al 30 de julio. Sin embargo, aparecen lagunas entre los días 14 al 16 y 22 al 25 de julio, y entre los días 31 de julio y 4 de agosto.

Una vez seleccionadas las imágenes, fue preciso someterlas a una serie de tratamientos previos, con objeto de garantizar su coherencia radiométrica y geométrica para análisis posteriores, pues para realizar cualquier estudio multitemporal a partir de la teledetección espacial es preciso que las mediciones realizadas por el sensor sean consistentes a lo largo de la serie. Esto implica realizar algunos procesos de ajuste radiométrico y geométrico que garanticen esa coherencia, de tal forma que los cambios detectados entre imágenes sean debidos a cambios reales en el terreno, y no a errores en el calibrado o en el registro espacial entre ellas.

Por lo que respecta a la corrección geométrica, las imágenes NOAA ofrecen una importante deformación longitudinal, debido a su gran ángulo de barrido, por lo que se hace necesario realizar una corrección previa al tratamiento de las mismas con objeto de que las imágenes que componen la serie puedan ajustarse entre sí y a una cartografía básica. En nuestro caso se ha seguido un método en tres fases:

(i) Navegación de la imagen, corrigiendo las bruscas deformaciones iniciales a partir de un modelo orbital elíptico.

(ii) Ajuste entre imágenes. Los desplazamientos entre imágenes se resolvieron mediante ajustes lineales, a partir de la selección de 7 a 11 puntos

de control, generalmente accidentes geográficos fácilmente identificables.

(iii) Corrección cartográfica de las imágenes. Con objeto de comparar los datos de superficie quemada obtenidos a partir de las imágenes, con los incluidos en las estadísticas del ICONA, se procedió a una referenciación de todas las imágenes a la proyección UTM, eligiendo un pixel de salida de 1×1 km.

3.3. Generación de índices de vegetación (NDVI) y MVC

El contraste radiométrico que, como ya hemos visto, presenta la vegetación sana entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano (Fig. 1), ha permitido establecer una serie de combinaciones aritméticas entre estas dos bandas que se denominan índices espectrales de vegetación (IV). Estos índices permiten deducir la intensidad de la actividad fotosintética de la vegetación, pudiendo caracterizar su estado vital, y resultar idóneos para discriminar vegetación afectada por alguna fuente de estrés. De todos los IV desarrollados hasta el momento, el más utilizado es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). El NDVI se calcula a partir de la diferencia de los valores de reflectividad en las dos bandas espectrales que estamos considerando, normalizada por su suma. Para este trabajo, hemos seguido la definición propuesta por CHE y PRICE (1992):

$$\text{NDVI} = \frac{L_2/S_2 - L_1/S_1}{L_2/S_2 + L_1/S_1} \quad [1]$$

donde L_2 y L_1 corresponden a las radiancias en las bandas del sensor AVHRR 2 y 1 (infrarrojo cercano y rojo, respectivamente), y S_2 y S_1 indican los valores de la irradiancia solar en el techo de la atmósfera para esas mismas bandas. El NDVI varía entre -1 (para las zonas desprovistas de vegetación) y $+1$ (para las zonas de vegetación vigorosa), con valores típicos para la vegetación entre $0,2$ y $0,7$, según su densidad y vigor vegetativo (HOLBEN, 1986).

En el caso de la vegetación quemada, parece lógico encontrar valores de NDVI más bajos que en

NDVI

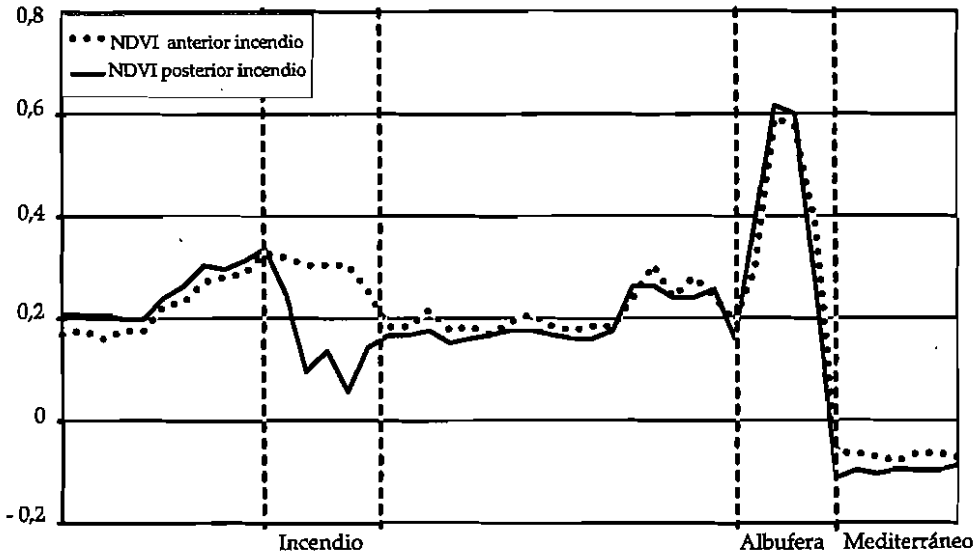


Fig. 3. Variación espacial del NDVI. Imágenes diarias.

la vegetación sana, al reducirse su reflectividad en el IRC y aumentar en el rojo (Fig. 1). Así pues, asumimos que la comparación de imágenes anteriores y posteriores a un incendio evidenciaría un drástico decremento en los valores del NDVI en las zonas quemadas. En consecuencia, a partir del análisis multitemporal podríamos delimitar con claridad la zona afectada por el fuego.

Para demostrar nuestra hipótesis hemos generado, para una imagen anterior y otra posterior al incendio de Buñol, unos perfiles espaciales que atraviesan la zona quemada (Fig. 3). La línea del perfil arranca desde un sector agrícola del municipio de Requena (al oeste de la imagen) y culmina en el mar Mediterráneo, atravesando el área quemada y la Albufera. El perfil obtenido a partir de la imagen anterior al incendio evidencia un incremento del NDVI al comenzar la zona forestal (de 0,2 a 0,35), una reducción al atravesar los espacios cultivados, desprovistos de vegetación en esta fecha, un aumento brusco al atravesar los cultivos regados de la Albufera, y un nuevo descenso al entrar en el mar. Si comparamos este

perfil con el obtenido a partir de la imagen posterior al incendio, vemos que siguen una trayectoria paralela, salvo en la zona afectada por el fuego, donde muestra un sensible decremento del NDVI, pasando de 0,35 a 0,03.

A pesar de su demostrada efectividad, el cálculo del NDVI está notablemente afectado por diversos factores, algunos de los cuales (fundamentalmente los relacionados con las condiciones atmosféricas y la geometría de la observación) implican una reducción importante de su valor. Para intentar minimizar algunas de estas distorsiones se han desarrollado una serie de técnicas basadas en la composición multitemporal de imágenes del NDVI convenientemente georeferenciadas. La más utilizada es la conocida como *Maximum Value Composite* (MVC), que se obtiene seleccionando, para cada pixel, el valor máximo del NDVI que se encuentre en la serie de imágenes considerada. El MVC minimiza los efectos de la atmósfera, pues el vapor de agua y los aerosoles provocan una reducción del NDVI, por lo que el máximo valor de la serie será el menos afectado por estos factores. Esta técnica reduce, igualmen-

te, los efectos del ángulo de observación, ya que el valor del índice generalmente disminuye a medida que el ángulo de observación aumenta. De esta forma, el MVC tiende a seleccionar el pixel más próximo al nadir, y, por tanto, el que presenta menores distorsiones para el período analizado. Por último, el MVC minimiza los efectos producidos por la variación en las condiciones de iluminación, seleccionando el pixel que ha sido captado con el menor ángulo cenital solar. HOLBEN (1986) recomienda realizar composiciones de siete a nueve días (coincidiendo con el ciclo orbital del satélite), aunque otros autores amplían este período hasta un lapso de quince días (SPANNER *et al.*, 1990). En nuestro caso optamos por una solución intermedia y generamos los MVC para períodos de 10 días, con un promedio de cuatro imágenes cada uno.

Al contar con un número reducido de imágenes para cada período no podemos afirmar que las alteraciones atmosféricas hayan sido totalmente eliminadas. Por esta razón, nos pareció oportuno corregir previamente algunos de los problemas que presentan los NDVI diarios. En concreto, la contaminación provocada por la cobertura nubosa puede eliminarse a partir de aislar las zonas con nubes en una imagen particular. Hemos basado esta discriminación en el contraste radiométrico que presentan las nubes entre las bandas térmicas y las visibles. En las primeras, como es lógico, las nubes ofrecerán un valor menor, al estar más frías que las cubiertas terrestres. A la vez, su reflectividad es alta en el visible. En consecuencia, en un cociente entre el visible y el infrarrojo térmico, estas zonas cubiertas por nubes ofrecen el valor más alto, al tener una elevada radiancia en la primera banda y baja en la segunda. Este fue el proceso aplicado en nuestro caso, mediante el cálculo, para cada imagen con cobertura nubosa, del siguiente cociente:

$$MN = L_v / L_t \quad [2]$$

donde MN es un índice para la obtención de la máscara de nubes, y L_v y L_t indican las radiancias de las bandas visible e infrarrojo térmico, respectivamente.

Las zonas cubiertas de nubes se aislaron señalando el rango más alto de valores en esa imagen-cociente. Estos valores se recodificaron a 0, que-

dando a 1 el resto. La máscara binaria resultante se multiplicó por los NDVI originales para generar imágenes sin nubes.

3.4. Técnicas de detección de cambios

En este proyecto hemos ensayado distintas técnicas de detección de cambios con el objeto de comprobar cuál de ellas resultaba más efectiva para aislar el área afectada por incendios forestales. Las técnicas ensayadas han sido las siguientes:

1. Diferencia simple (DS):

$$NDVI_{\text{cambio}} = NDVI_{t_2} - NDVI_{t_1} \quad [3]$$

2. Diferencia normalizada (DN):

$$NDVI_{\text{cambio}} = \frac{NDVI_{t_2} - NDVI_{t_1}}{NDVI_{t_2} + NDVI_{t_1}} \quad [4]$$

donde $NDVI_{t_1}$ y $NDVI_{t_2}$ corresponden, respectivamente, a una fecha anterior y posteriora al incendio.

3. Componentes principales (CP), utilizando NDVI de fechas anteriores y posteriores a los incendios con el objetivo de identificar el «componente de cambio».

Una vez determinadas las técnicas de detección de cambios que pretendemos aplicar a nuestras imágenes, el problema está en seleccionar adecuadamente las fechas de referencia. Las imágenes diarias tienen el inconveniente de estar afectadas por condiciones extrañas a los cambios mismos de la vegetación (como son los factores atmosféricos y los derivados del propio sensor). Los MVC son más adecuados en este sentido, pero resultan menos sensibles que los diarios a los cambios, al tratarse de una composición que retiene el valor máximo de varias fechas. Puesto que el NDVI del área quemada es bastante bajo, la técnica del MVC puede tener un valor defectuoso que, pese a ello, supere al de la zona quemada. Además, hay que tener en cuenta los posibles errores derivados de un mal ajuste entre imágenes. Al retener el MVC el valor máximo de la serie de imágenes, en áreas mal registradas, se

elegiría el pixel no afectado por el incendio, pues ofrecería un valor más alto que el resto. Con objeto de comprobar la validez de los dos procedimientos, hemos optado por presentar los resultados de dos evaluaciones: una, utilizando los MVC, y otra, a partir de imágenes diarias.

Para obtener el mapa de áreas quemadas, con su consiguiente inventario estadístico, bastó aplicar cada una de las técnicas de detección de cambios que acabamos de describir a los valores del NDVI para dos fechas de referencia. En primer lugar, se compararon el primer MVC de la serie, elaborado a partir de las imágenes disponibles en el período comprendido entre el 5 y el 14 de julio, con el último MVC, que abarca las imágenes de los días finales de la serie (4 al 13 de agosto). A continuación se compararon directamente los NDVI correspondientes a una de las imágenes iniciales (11 de julio) con una de las imágenes finales (4 de agosto). En el caso de las imágenes diarias, se trató de garantizar, en lo posible, la coherencia radiométrica seleccionando aquellas imágenes que presentaban las mejores condiciones, tanto atmosféricas (libres de nubes), como geométricas (próximas al nadir).

Tras obtener las imágenes de cambio aplicando las técnicas ya mencionadas, se establecieron, teniendo en cuenta distintos criterios, una serie de rangos críticos con objeto de discriminar el área quemada en cada una de ellas. Se trataba de aislar aquellas zonas que habían experimentado un mayor decremento en los valores del NDVI entre las dos fechas de referencia. Posteriormente, se aplicó un análisis de contigüidad con el propósito de que los píxeles adyacentes, dentro de cada sector quemado, se unieran para formar una categoría específica. De esta forma, etiquetados con un código específico los píxeles incluidos en cada incendio, pudo calcularse la extensión del área afectada, puesto que conocíamos el tamaño real de cada pixel (Tablas I y II). Finalmente, añadimos algunos elementos gráficos para obtener la cartografía de áreas quemadas.

4. RESULTADOS

Una vez obtenida la cartografía (Lámina II) y evaluación superficial (Tablas I y II) de los incendios ocurridos en nuestra zona de estudio pasamos a analizar los resultados comparándolos con

la información que el ICONA proporciona a través de los partes de incendios. Una primera dificultad a la hora de realizar esta verificación nos ha venido dada por la falta de referenciación espacial de los partes de incendios. Con la información facilitada por el ICONA, sólo podemos saber el municipio de origen del fuego, así como los afectados por el mismo, pero no se describe el perímetro del área quemada, ni se facilitan las coordenadas del foco de ignición. En consecuencia, en algunos casos, ha resultado bastante difícil hacer corresponder las superficies quemadas identificadas a partir de las imágenes con las estadísticas de que disponíamos. Tan sólo para el incendio de Buñol hemos contado con estadísticas más completas, que incluyen también la delimitación del perímetro final del área afectada por el fuego mediante G.P.S. En cualquier caso, es necesario destacar la falta de acuerdo entre las distintas fuentes analizadas: estadísticas del ICONA, estadísticas de la Generalitat Valenciana y datos obtenidos con G.P.S (Tablas I y II), lo que ha dificultado aún más la verificación de nuestros resultados.

Si comparamos las estimaciones de áreas quemadas obtenidas con las distintas técnicas a partir de los MVC y de los valores diarios, podemos comprobar que, en todos los casos, se han identificado el mismo número de incendios (Tablas I y II). La estimación de las superficies quemadas en los incendios de Yátova (B) y Chiva (A), que han sido el objeto más destacado de este trabajo, resulta bastante certera frente a las estadísticas del ICONA, especialmente en la realizada sobre las imágenes diarias con la técnica de diferencias simples, donde se alcanzan porcentajes de ajuste próximos al 100%, con una sobreestimación del área quemada que supone solamente un 2% del total de la superficie afectada. La sobreestimación es mayor (4%) si consideramos la técnica de la diferencia normalizada, mientras que en el caso de los componentes principales se produce una subestimación del 13%.

Si analizamos los resultados obtenidos con los MVC observamos, en primer lugar, que los incendios de Chiva y Yátova aparecen formando un solo incendio, por lo que no contamos con las estadísticas desglosadas, además se puede observar que en todos los casos se produce una subestimación del área quemada que oscila entre el 7%

TABLA I
COMPARACION ENTRE LOS DATOS DEL ICONA Y LOS OBTENIDOS CON LAS IMAGENES PARA EL
INCENDIO DE BUÑOL (SUPERFICIE AFECTADA EN HECTAREAS)

Identificación incendio		Fuentes		Imágenes diarias			MVC		
		ICONA	G.P.S.	Diferencia simple	Diferencia normalizada	Componentes principales	Diferencia simple	Diferencia normalizada	Componentes principales
Chiva (A)	Forestal	3.550	—	3.800	3.700	3.100	—	—	—
	No forestal	104	—	400	300	300	—	—	—
	Total	3.654	3.753	4.200	4.000	3.400	—	—	—
Yátova (B)	Forestal	15.400	—	16.400	16.900	14.100	—	—	—
	No forestal	2.015	—	1.000	1.200	900	—	—	—
	Total	17.415	18.764	17.400	18.100	15.000	—	—	—
Buñol (A+B)	Forestal	18.950	—	20.200	20.600	17.200	18.600	18.100	17.500
	No forestal	2.119	—	1.600	1.500	1.200	1.200	1.500	1.100
	Total	21.069	22.517	21.600	22.100	18.400	19.800	19.600	18.600

TABLA II
COMPARACION ENTRE LOS DATOS DEL ICONA Y LOS OBTENIDOS CON LAS IMAGENES PARA LOS
INCENDIOS DEL SURESTE (SUPERFICIE AFECTADA EN HECTAREAS)

Identific. incendio	Fuentes			Imágenes diarias			MVC		
	ICONA	Generalitat	G.P.S.	Diferencia simple	Diferencia normalizada	Componentes principales	Diferencia simple	Diferencia normalizada	Componentes principales
Tabernes (C)	1.077	—	1.835	1.400	1.300	600	1.300	1.100	1.100
Carcagente (D+E)	667	2.550	4.525	3.000	3.100	2.500	2.900	2.600	—
Luchente (F)	3.841	2.365	—	3.600	3.400	2.800	3.600	3.200	—
Villalonga (G)	1.605	1.605	—	1.900	1.800	1.600	1.400	1.200	1.600

para la diferencia simple y el 12% en los componentes principales.

Aunque las imágenes utilizadas para la comparación multitemporal no son las mismas que las empleadas en nuestro anterior trabajo (MARTÍN *et al.*, 1994), los resultados indican asimismo que las imágenes diarias ofrecen mejor estimación que los MVC y que la diferencia simple aporta, en términos generales, la delimitación más clara del perímetro quemado, siendo menos consistentes —esto es más dependientes de las imágenes de partida— la diferencia normalizada y, sobre todo, los componentes principales.

El resto de los incendios, localizados al Sureste del área de estudio (Tabla II), resultan de más difícil adscripción, al no existir una referenciación geográfica de los mismos. Para ayudar en su identificación hemos analizado cuidadosamente cada una de las imágenes de la serie con objeto de identificar la fecha exacta en que se produjeron los distintos incendios. Esto facilitó, en algunos casos, la identificación de los mismos en las estadísticas disponibles. Teniendo en cuenta el tamaño del pixel de las imágenes NOAA (1,1 × 1,1 km), hemos considerado aquí exclusivamente aquellos incendios que afectaron a una superficie superior a las 500 ha.

La falta de acuerdo entre las distintas fuentes consultadas se hace especialmente evidente en estos incendios menores, con los que la verificación resulta prácticamente imposible. De ahí la conveniencia de contar con el perímetro del área quemada para verificar, con mayor detalle, las divergencias encontradas entre el inventario que proporciona el ICONA y el obtenido a partir de las imágenes. En cualquier caso, el método más apropiado para la evaluación superficial del área quemada parece ser la resta simple de los valores diarios del NDVI, en lugar de los MVC, por ser aquéllos más sensibles a las variaciones superficiales de los NDVI, y estar menos afectados por problemas de ajuste entre imágenes.

5. CONCLUSIONES

Queda patente el interés de la información obtenida a partir de los canales rojo e infrarrojo cercano del sensor AVHRR para el estudio de las variaciones producidas en la cubierta vegetal a partir de la generación de índices de vegetación. Hemos podido constatar los fuertes decrementos en el valor del NDVI para la zona afectada por el fuego. Esto facilita, tanto la delimitación del perímetro, como la cuantificación de la superficie afectada a partir de imágenes AVHRR. Así pues, la metodología propuesta parece ser muy válida para la obtención de estadísticas de incendios, al menos en grandes superficies.

Los principales problemas encontrados afectan por un lado al propio sensor y, por otro, a la información estadística disponible, que dificulta notablemente la verificación de los resultados. Refiriéndonos al sensor, las estadísticas muestran muy buenos ajustes para el incendio que afectó a la Hoya de Buñol. La divergencia frente a otros incendios es mayor, aunque no hemos podido contrastar claramente los errores ante la ausencia de una referenciación cartográfica de los mismos en los partes de incendios disponibles en el ICONA.

Se ha demostrado que la comparación de los valores diarios del NDVI para imágenes anteriores y posteriores al incendio ofrece estimaciones más certeras que la realizada a partir de los MVC, por lo que, de modo preliminar, podemos considerar el primer método como el más apropiado para realizar la cartografía y evaluación de áreas quemadas. En cuanto al método más idóneo para la detección de cambios, los resultados favorecen el empleo de la resta simple y normalizada, siendo más pobres los obtenidos con el análisis de componentes principales, tal vez como consecuencia de incluir sólo dos imágenes.

Por último, cabe reseñar que la fiabilidad de la aplicación de la metodología aquí empleada es muy dependiente de la resolución espacial del sensor. Al trabajar con imágenes AVHRR, sólo podremos disponer de estimaciones superficiales para incendios de grandes proporciones. Por lo demás, una metodología similar sería perfectamente aplicable a imágenes de alta resolución (como las del Landsat o SPOT; VIEDMA y CHUVIECO, 1993). Sin embargo, debido a la frecuencia de paso de este tipo de sensores, la cobertura nubosa puede ofrecer problemas importantes al abordar la evaluación de la superficie afectada por el fuego. Además el coste de este tipo de imágenes hace prácticamente inviable su utilización para la obtención de una cartografía de incendios a escala nacional o regional.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por el Servicio de Defensa contra Incendios Forestales del ICONA, sin cuya colaboración y la de su director, el Dr. Ricardo Vélez, no hubiera sido posible llevarlo a cabo. La información obtenida del centro regional de Valencia y el informe sobre el incendio de Buñol realizado por D. Rafael Currás, fueron de gran ayuda para la verificación de resultados. Las empresas AURENSA e INFO-CARTO, S. A., prestaron igualmente su colaboración en la lectura de las imágenes NOAA.

SUMMARY

This paper explores the suitability of multitemporal analysis of satellite imagery for mapping and evaluation of large forest fires. Examples are presented on fires affecting the Mediterranean coast of Spain during the summer of 1991. Geometrical and radiometric corrections were applied to a multitemporal set of NOAA-AVHRR images. Change detection techniques were used to discriminate burned land on NDVI images from before and after the fire. Accuracy was checked using fire statistics from the Spanish Forest Service.

Key words: Remote Sensing, forest fires, mapping, NOAA-AVHRR.

BIBLIOGRAFIA

- CHE N. y PRICE J. C. 1992: «Survey of radiometric calibration results and methods for visible and near infrared channels of NOAA-7, -9, and -11 AVHRRs». *Remote Sensing of Environment*, 25, pp. 19-27.
- CHUVIECO E. 1990: *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid, Rialp.
- CHUVIECO E. y CONGALTON R. G. 1988: «Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data». *Geocarto International*, 3, pp. 41-53.
- CHUVIECO E. y MARTIN M. P. 1994: «Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, n.º 5, pp. 563-570.
- FLANNIGAN M. D. y VONDER HAAR T. H. 1986: «Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR». *Canadian Journal of Forest Research*, 16, pp. 975-982.
- HOLBEN B. N. 1986: «Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data». *Int. Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1434.
- HOPE A. S. y MCDOWELL T. P. 1992: «The relationship between surface temperature and a spectral vegetation index of a tallgrass prairie: effects of a burning and other landscape controls». *International Journal of Remote Sensing*, 13, pp. 2849-2863.
- JAKUBAUSKAS M. E.; LULLA K. P. y MAUSEL P. W. 1990: «Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, pp. 371-377.
- KASISCHKE S.; FRENCH N. H.; HARRELL P.; CHRISTENSEN N. L.; USTIN S. L. y BARRY D. 1993: «Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data». *Remote Sensing of Environment*, 45, pp. 61-71.
- LÓPEZ M. J. y CASELLES V. 1991: «Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data». *Geocarto International*, 6, pp. 31-37.
- MALINGREAU J. P. 1984: «Remote sensing and disaster monitoring, a review of application in Indonesia». *Proc. 18th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, París, pp. 283-283.
- MALINGREAU J. P. 1990: «The contribution of remote sensing to the global monitoring of fires in tropical and subtropical ecosystems». En: *Fire in Tropical Biota*, J. G. GOLDAMMER (Ed.), Berlín, Springer Verlag, pp. 337-370.
- MARTÍN M. P. y CHUVIECO E. 1993: «Using AVHRR images for fire mapping and fire growth monitoring in the mediterranean forests». *International Workshop on Satellite Technology and GIS for mediterranean forest mapping and fire management*, Thessaloniki, (en prensa).
- MARTÍN M. P.; VIEDMA O. y CHUVIECO E. 1994: «High versus low resolution satellite images to estimate burned areas in large forest fires». *Second International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra (en prensa).
- ROBINSON J. M. 1991: «Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing». *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 3-24.
- SETZER A. W. y PEREIRA M. C. 1991: «Operational detection of fires in Brazil with NOAA-AVHRR». *Proc. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Río de Janeiro, pp. 469-482.

- SPANNER M. A.; PIERCE L. L.; RUNNING S. W. y PETERSON D. L. 1990: «The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forest; relationship with Leaf Area Index». *Remote Sensing of Environment*, 33, pp. 97-112.
- TANAKA S.; KIMURA H. y SUGA Y. 1983: «Preparation of a 1:25.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island». *International Journal of Remote Sensing*, 4, pp. 17-31.
- VIEDMA O. y CHUVIECO E. 1993: «Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de la Hoya de Buñol (Valencia)». *Boletín Técnico de AITIM*, 167, pp. 60-66.