

Cartografía, evaluación y seguimiento de grandes incendios forestales a partir de imágenes NOAA-AVHRR

M. Pilar Martín, Emilio Chuvieco y Luis Domínguez

Departamento de Geografía
Universidad de Alcalá de Henares

RESUMEN

Esta comunicación presenta los resultados obtenidos, a partir del análisis de imágenes NOAA-AVHRR, de un gran incendio forestal ocurrido en la costa mediterránea española. A partir de los índices de vegetación (NDVI), derivados de imágenes anteriores y posteriores al incendio, se utilizaron técnicas de detección de cambios para discriminar el área quemada. El mismo procedimiento se aplicó a los MVC, calculados a partir de los NDVI diarios, con objeto de comprobar los efectos de esta composición multitemporal sobre la estimación del área quemada. Aunque ambas estimaciones resultaron bastante precisas, la obtenida con las imágenes diarias ofreció mejores resultados. Finalmente, teniendo en cuenta la sensibilidad espectral del canal 3 para detectar focos de alta temperatura, realizamos el seguimiento de la evolución espacial del incendio a partir de las imágenes disponibles en los días que duró el evento.

ABSTRACT

This paper presents some results obtained from the analysis of NOAA-AVHRR images over a large forest fire on the Mediterranean coast of Spain. Vegetation indices were generated for the days before and after the fire, and change detection techniques were applied to classify burned areas. The effect of misregistration errors in maximum value composites (MVC) were tested by comparing the accuracy of area estimation from both MVC and single NDVI images. Although both performed quite well, single NDVI cloud free and near nadir images provided better accuracy. Taking advantage of the spectral sensitivity of channel 3 to detect areas of high temperature, we have also monitored fire growth evolution using diurnal and nocturnal images.

Introducción

Los incendios forestales constituyen uno de los principales problemas ecológicos planteados en el área mediterránea, debido a la extensión, frecuencia e intensidad que han adquirido en los últimos años.

Uno de los problemas a los que deben hacer frente los países con alta incidencia de incendios forestales es la evaluación rápida de los efectos producidos por el fuego. Hasta hace muy poco tiempo, la delimitación del área quemada y la evaluación de daños se realizaba mediante trabajo de campo, recorriendo la zona afectada por el incendio, o a través de la interpretación visual de fotografías aéreas. Sin embargo, estos procedimientos, además de lentos (se llevaban a cabo semanas, e incluso meses después de que el fuego hubiera ocurrido), resultaban poco precisos, pues ofrecían inventarios demasiado generales.

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. Una de ellas es el empleo de la teledetección espacial que permite obtener un inventario rápido y preciso de las superficies incendiadas, así como de su posterior dinámica. Gracias a la estabilidad orbital de los satélites de teledetección, podemos disponer de un seguimiento bastante exhaustivo de las características de la vegetación (composición, morfología), y de su estado previo y posterior al incendio. La información que aportan estos equipos 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).

El empleo de imágenes NOAA-AVHRR en la cartografía y evaluación de áreas quemadas

En los últimos años se han desarrollado experiencias de gran interés sobre cartografía de áreas quemadas a partir de la teledetección espacial, utilizando, mayoritariamente, sensores de alta resolución espacial como Landsat-MSS y Landsat-TM (Hitchcock y Hoffer, 1974; Minick y Shain, 1981; Isaacson et al., 1982).

Por lo que respecta a los sensores de baja resolución como NOAA, su aplicación a la cartografía y evaluación de incendios forestales, se ha incrementado notablemente en los últimos años, siendo cada vez más frecuentes los trabajos de investigación en este campo. Su buena resolución espectral, junto a la adecuada resolución temporal y al tamaño medio del píxel, convierten al AVHRR, 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) del sensor AVHRR (Chuvieco y Martín, 1993). Su

eficacia para esta aplicación se ha demostrado en numerosos estudios, especialmente sobre áreas de difícil acceso y detección por medios convencionales, como es el caso de Indonesia, donde se utilizaron imágenes GAC para estudiar los incendios catastróficos ocurridos en 1983 (Malingreau, 1984), y Canadá (Flannigan y Vonder Haar, 1986), donde las imágenes en formato HRPT permitieron identificar, sobre un período de cinco días, un total de 355 incendios. Estudios similares se han llevado a cabo en la Amazonia (Matson y Holben, 1987; Setzer et al, 1988), China (Jijia et al, 1989) y África Ecuatorial (Langaas, 1992). En la Amazonia brasileña se han desarrollado varios proyectos para estimar el área total afectada anualmente por incendios forestales, con objeto de calcular la tasa de deforestación anual que está experimentando el país (Setzer y Pereira 1991b).

A pesar de que el canal 3 del AVHRR ha demostrado su utilidad, tanto para la detección como para la cartografía y evaluación de incendios forestales, existen varios factores que dificultan la utilización operativa de estas imágenes. Por un lado, el propio tamaño del píxel (en torno a 1 km² en el nadir), que condiciona la superficie mínima que debe estar ardiendo para que el incendio pueda detectarse en la imagen (Malingreau, 1990). Ese umbral depende bastante de la temperatura de combustión del incendio, así como del contraste térmico que ofrezca la superficie quemada con las otras cubiertas que ocupan un determinado píxel y no se encuentren ardiendo. El método multispectral propuesto por Dozier (1981) y Matson y Dozier (1981), con los canales 3 y 4 del AVHRR, soluciona en parte este problema. Esta técnica permite determinar la temperatura y extensión del incendio para un píxel parcialmente afectado por el fuego, comparando las diferencias en las radiancias de los canales 3 y 4, para ese píxel, y para los inmediatos al incendio. Sin embargo, este método presenta algunas limitaciones, como es la existencia de nubes o humo con extensiones menores que el área de un píxel, que modificará los valores de las temperaturas y los resultados obtenidos. Asimismo, conviene notar que este método sólo puede utilizarse cuando los canales 3 y 4 no están saturados, lo cual ocurre frecuentemente, puesto que un píxel puede alcanzar la temperatura de saturación incluso si sólo una pequeña porción del mismo está ocupada por el fuego (Setzer y Pereira, 1991a; Pereira et al, 1991).

Otro problema ligado a la baja sensibilidad del canal 3, que se satura a los 47° C (320 K), es la posible confusión entre incendios y otros rasgos del paisaje muy calientes en las imágenes de verano, como bordes de nubes o suelos desnudos (Belward, 1991). Esta confusión es especialmente clara en los espacios mediterráneos, en donde las masas forestales se imbrican frecuentemente con espacios agrícolas o suelos desnudos. Una forma de resolver el problema es acudir a imágenes nocturnas, en donde pierda importancia la temperatura debida al calentamiento directo del Sol, y sólo queden en evidencia los focos de calor activos (Malingreau, 1990; Langaas, 1992).

Otras fuentes de error derivadas del uso del canal 3 para la detección de incendios hacen referencia a la presencia de nubes (Flannigan y Vonder Haar, 1986; Hougham, 1987; Setzer y Pereira, 1991a), la hora de adquisición de las imágenes y la geometría del sensor (Setzer y Pereira, 1991a).

A pesar de que la mayoría de los trabajos se han centrado en la utilización del infrarrojo térmico, hemos encontrado 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 anterior y posterior al incendio. (Malingreau, 1984). También se ha comprobado esta sensible reducción en perfiles espaciales (Matson y Holben, 1987).

En un estudio más reciente, llevado a cabo sobre una amplia zona de bosque boreal en el interior de Alaska (Kasischke et al, 1993), se han utilizado dos imágenes obtenidas a partir del máximo valor compuesto (MVC), para la evaluación de áreas quemadas. La resta de ambas permitió evidenciar la eficacia del análisis multitemporal de los NDVI para detectar grandes incendios (hasta el 89,5% de fiabilidad en los superiores a 2.000 ha), aunque la precisión disminuye para los de más de 1.000 ha, hasta llegar al 73,2%.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es evaluar las posibilidades de la aplicación de imágenes NOAA-AVHRR a la cartografía e inventario de superficies afectadas por incendios forestales, así como al seguimiento de la evolución espacial de grandes incendios. Como acabamos de ver, la mayoría de los proyectos desarrollados hasta el momento en este campo se han basado en la utilización del canal 3. Nuestro propósito era comprobar la fiabilidad del análisis multitemporal de índices de vegetación para la estimación del área quemada.

El principal problema que se deriva del análisis multitemporal de NDVI es la calibración radiométrica de las imágenes diarias. La mayor parte de los autores recomiendan realizar composiciones multitemporales de los NDVI, de cara a eliminar los ruidos introducidos por la dispersión atmosférica y el ángulo de barrido del sensor. De todas ellas, la conocida como *Maximum Value Composite* (MVC) es la más frecuentemente utilizada en estudios de vegetación a escala global. Sin embargo, considerábamos que esta composición podía ofrecer resultados menos precisos que las imágenes diarias, debido a posibles desajustes entre imágenes y al propio proceso de composición. Por lo tanto, nuestro segundo objetivo consistió en verificar la eficacia de los MVC, frente a los NDVI diarios para la estimación del área afectada.

Por último, ensayamos la aplicación de imágenes diarias del canal 3 para el se-

guimiento de la evolución espacial de un gran incendio. Esta información puede ser de gran utilidad para mejorar y validar los resultados obtenidos a partir de algunos programas de simulación del comportamiento espacial de grandes incendios.

Metodología

El área de estudio

Para aplicar nuestro ensayo metodológico se ha elegido como área piloto un sector de 30.609 km² situado al este de la Península Ibérica, ocupando el área central de la fachada mediterránea (fig. 1). Esta zona, frecuentemente afectada por los incendios forestales, sufrió uno de especial importancia en los últimos días del mes de julio, que arrasó unas 18.000 ha. de superficie forestal en la comarca valenciana conocida como Hoya de Buñol.

El área de estudio 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



Figura 1
Localización del área de estudio

incendios anteriores, cubre en mayor o menor medida a tomillares y coscojares. Por lo que respecta a la topografía 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, que llegan a la costa valenciana, tras su paso por la recalentada Meseta, provocando un efecto abrasador. En estas situaciones, 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. Además, es preciso considerar, como factor decisivo en este fenómeno, la actividad humana de la zona, tanto en lo que se refiere al uso agrícola de la tierra, como a las actividades de carácter turístico o recreativo.

El incendio de la Hoya de Buñol, en el que se centra nuestro estudio, se inició en la tarde del día 28 de julio de 1991 y se extinguió el 4 de agosto. Tuvo su primer origen en una causa natural (un rayo provocado por una tormenta seca). Sin embargo, 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.

Selección y corrección de las imágenes

Para la obtención de los objetivos antes mencionados, se han utilizado en este proyecto un total de 20 imágenes, procedentes de la estación de Maspalomas y la Universidad de Valladolid, que abarcan el período comprendido entre el 10 de julio y el 13 de agosto de 1991). Esta serie resulta bastante consistente para los días 10 al 13 y 26 al 31 de julio. Sin embargo, aparecen lagunas entre los días 14 al 16 y 22 al 25 de julio, y en los días 1 y 2 de agosto. Estas últimas son de notable importancia para los objetivos de nuestro trabajo, ya que no pudimos completar una serie diaria para el seguimiento de la evolución del incendio que afectó a la Hoya de Buñol.

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.

En cuanto a la corrección geométrica, se ha seguido un método en tres fases:

- (I) Navegación de la imagen 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.

Generación de índices de vegetación (NDVI) y MVC

Como es bien sabido, los NDVI se obtienen por la combinación entre las reflectividades medidas en el infrarrojo cercano y rojo, para una parcela determinada del terreno. 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.

Para el cálculo de las radiancias a partir de los valores digitales (ND) de la imagen, es preciso aplicar los coeficientes de calibrado del sensor:

$$L_i = \alpha_i (\text{ND}_i - \text{Of}_i) \quad [2]$$

donde α_i indica el coeficiente de calibrado para la banda i , y Of_i el valor de sesgo para esa misma banda. Para NOAA-11, $\alpha_1 = 0,612$, $\alpha_2 = 0,411$ (Che y Price, 1992). Se han calculado los coeficientes de degradación desde la fecha de lanzamiento hasta agosto de 1991), Of_1 y $\text{Of}_2 = 40$ (Holben et al., 1990), $S_1 = 518,5$ y $S_2 = 335,2$ (Abel, 1990).

Como ya comentamos previamente, la mayor parte de los autores recomiendan realizar composiciones multitemporales de los NDVI, de cara a eliminar los ruidos introducidos por la dispersión atmosférica y el ángulo de barrido del sensor. Puesto que estos factores implican una reducción del valor del NDVI, se recomienda realizar una composición que retenga, para cada píxel, el valor máximo del NDVI en la serie de imágenes considerada. Esta técnica, conocida como composición del máximo valor (*Maximum Value Composite*, MVC: Holben, 1986), resulta mucho más fiable que los datos diarios, al precio de reducir la frecuencia disponible de las imágenes. Hol-

ben (1986) recomienda realizar composiciones de siete a nueve días (coincidiendo con el ciclo orbital del satélite), aunque otros autores sugieren ampliar este período hasta un lapso de quince días (Spanner, 1990).

En nuestro caso, la serie de imágenes no era lo suficientemente larga para generar MVC tan prolongados, puesto que hubiera supuesto una sensible generalización de los perfiles temporales. En consecuencia, generamos MVC para períodos de 7 días, con un promedio de cuatro imágenes cada uno.

Para la estimación del área quemada resulta bastante crítico eliminar el efecto de las nubes. Hemos basado esta discriminación en el contraste radiométrico que presentan las nubes entre las bandas térmicas y las visibles mediante el empleo de un sencillo cociente:

$$MN = L_v / L_t \quad [3]$$

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

Técnicas de detección de cambios

En este proyecto hemos ensayado una sencilla técnica de detección de cambios para aislar el área afectada por el incendio, partiendo de la comparación de los valores del NDVI para fechas anteriores y posteriores al evento. 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 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. Además, en estos últimos hay que tener en cuenta los posibles errores derivados de un mal ajuste entre imágenes. Al retener los MVC el valor máximo de la serie de imágenes, en áreas mal registradas, se elegiría el píxel 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 una resta entre los valores del NDVI para dos fechas de referencia. En primer lugar, se compararon los MVC de los días iniciales de la serie (10 al 13 de julio), con los finales (4 al 13 de agosto). Esto es:

$$\text{MVCCAM} = (\text{MVC4 (agosto)} - \text{MVC1 (julio)}) + 100 \quad [4]$$

A continuación se restaron directamente los NDVI correspondientes a la imagen inicial (10 de julio) y la inmediatamente posterior al incendio (4 de agosto).

Las imágenes resultantes, que representan el decremento del índice, ofrecerían valores por encima de 100 para aquellas áreas con índices inferiores en julio que en agosto (ganancias de vegetación), y por debajo de este umbral se situarían las áreas que hubieran perdido vegetación entre las dos fechas. Así, los píxeles con un mayor decremento del índice, identificarían las zonas quemadas, al tratarse de sectores con una pérdida más brusca de vegetación entre ambas fechas. En ambos casos, los decrementos del NDVI se han obtenido tras paliar el efecto de cobertura nubosa, muy importante en este sentido, ya que la presencia de nubes implica una notable reducción del valor del NDVI, que no está originada por un cambio en la vegetación.

Tras el cálculo del valor del decremento, se seleccionó un rango crítico para la imágenes obtenidas a partir de la resta entre los NDVI diarios y los correspondientes a los MVC. Se trataba de restringir el área quemada, discriminándose, para ello, los decrementos del NDVI superiores a 0,2, que se recodificaron a 1, mientras al resto se le asignó un código de 0.

Para obtener la cartografía final del área quemada, se aplicó un análisis de contigüidad, con objeto de que los píxeles adyacentes, dentro de cada sector quemado, se unieran para formar un solo grupo (fig. 2). Una vez agrupados los píxeles afectados por cada incendio, basta calcular el área que ocupan sobre la imagen y, conociendo el tamaño del píxel, también sobre el terreno.

Temperaturas de brillo multitemporales

El análisis de la evolución espacial del incendio se vio limitado, como ya apuntamos al principio, por la falta de imágenes correspondientes a 3 de los 7 días que duró el incendio. Para este estudio utilizamos 5 imágenes: 29 y 30 de julio (ambas diurnas), 3 de agosto (nocturna) y 4 de agosto (diurna y nocturna).

El análisis de temperaturas requiere, en primer lugar, convertir los valores digitales de la imagen a temperaturas de brillo. Para ello, hemos utilizado la fórmula propuesta por la Agencia Espacial Europea, en el formato SHARP (ESA-EPO, 1992):

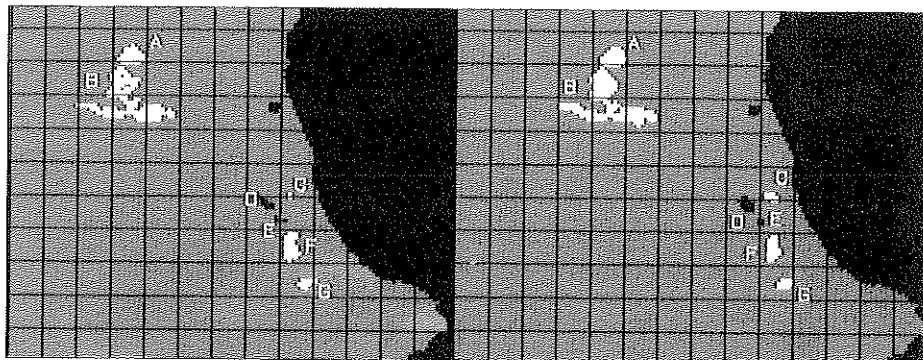


Figura 2

Cartografía de áreas quemadas sobre los MVC (izquierda) y sobre los NDVI diarios (derecha)

$$L_i = A_i * ND_i + B_i \quad [5]$$

donde L_i indica la radiancia espectral en una de las bandas infrarrojas; ND_i el valor digital de la imagen, y A_i y B_i los coeficientes de calibración, utilizados por el sensor para la codificación de radiancias, que están incluidos en la cinta.

Una vez obtenidas las radiancias para cada canal, puede calcularse la temperatura de brillo a partir de invertir la fórmula de Planck, despejando la temperatura (Kidwell, 1991):

$$T_b = \frac{c_2 v}{\ln(1 + c_1 v^3 / E)} \quad [6]$$

donde T_b indica la temperatura de brillo; v la longitud de onda central de la banda correspondiente (Kidwell, 1991), y c_1 y c_2 son constantes ($c_1 = 1,1910659 \times 10^{-5}$ mil wattios/m² sr cm⁻⁴ y $c_2 = 1,438833$ cm. K).

Para este proyecto, pretendíamos únicamente seguir la evolución del incendio de Buñol, por lo que no resultó preciso realizar ulteriores correcciones de estos valores de temperatura.

Para analizar con mayor detalle la evolución de la superficie quemada, hemos realizado una composición multitemporal de los valores obtenidos en las temperaturas de brillo. A partir de un umbral crítico, hemos aislado los píxeles donde el incendio

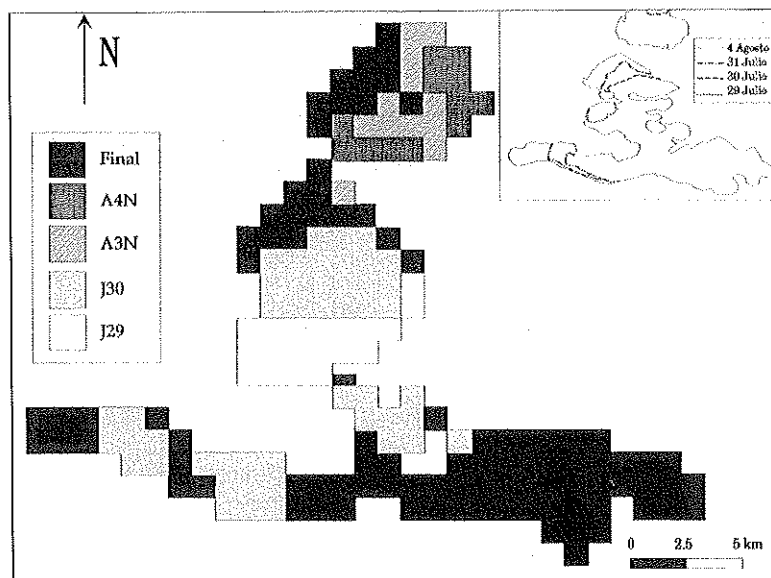


Figura 3

Evolución espacial del incendio. En la esquina superior derecha, perímetro final y evolución del frente de llamas según datos de ICONA

estaba activo en el momento de la adquisición de las imágenes de esta serie. Este umbral se ha señalado entre 317 y 323 K para las imágenes diurnas, y entre 295 y 320 K para las nocturnas. Se han recodificado a 0 los píxels que se situaban fuera de estos umbrales, señalando el área quemada en cada imagen con un código específico, con objeto de mantener la información relativa al día en que cada zona se encontraba ardiendo. Para evitar las confusiones con los suelos desprovistos de vegetación circundantes, hemos multiplicado cada una de estas imágenes por una máscara binaria con la zona total afectada por el fuego, tal y como se delimitó a partir de los NDVI. Finalmente, realizamos una superposición de las imágenes con objeto de obtener un mapa que sintetizase la evolución espacial del incendio, de tal forma que, en cada categoría aparecen representados los píxels que estaban activos en cada una de las fechas analizadas. De esta forma, hemos obtenido la figura 3, que recoge la evolución de la superficie quemada para las fechas disponibles.

Resultados

Estimación del área quemada

La tabla I recoge la estimación del área quemada obtenida a partir del análisis de los NDVI diarios y de los MVC. Aunque hasta el momento hemos considerado el incendio de Buñol como un solo evento, de hecho afectó a dos focos distintos (Chiva y

IDENTIF. INCENDIO	MUNICIPIO INICIO INCENDIO	DATOS ICONA (A)	MVC4-MVC1 (B)	B/A (%)	agost. julio (C)	C/A (%)
A	Cliva	3.550	3.100	87,3	3.400	95,8
B	Yátova	15.400	13.600	88,3	15.000	97,4
C	Tabernes de V.	1.077	200	18,6	900	83,6
D, E y F	Alcira, Simat de Valldigna, Carcagente, Cuatretonda, Luchente y Rótova	3.907	4.700	120,3	4.500	115,2
G	Villalonga, Beniatjar, Benialí, Lorchá, Beniarrés y Vall de Ebro	3.035	1.100	36,2	1.300	42,8

Tabla 1
Comparación entre los datos del ICONA y los obtenidos de las imágenes (superficie afectada en hectáreas)

Yátova), separados por la carretera Nacional III. En ambos casos la estimación de las superficies quemadas con imágenes NOAA resulta bastante certera frente a las estadísticas del ICONA, especialmente en la realizada sobre los NDVI diarios, donde se alcanzan porcentajes de ajuste superiores al 95%.

El resto de los incendios, localizados al sureste del área de estudio, resultan de más difícil adscripción, al no existir una referencia geográfica de los mismos. Como podemos ver en la tabla 1, para estos incendios menores las estimaciones del ICONA y las obtenidas en nuestro trabajo presentan un menor ajuste. Así, el incendio de Tabernes muestra una variación notable entre las tres estimaciones, al tratarse de un área relativamente pequeña, probablemente contaminada por píxels de borde. Queda patente pues, 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 de los valores diarios del NDVI, en lugar de los MVC, por ser aquellos más sensibles a las variaciones superficiales de los NDVI, y estar menos afectados por problemas de ajuste entre imágenes.

Cartografía del área quemada

Para la verificación espacial de los resultados, utilizamos la información facilitada por el ICONA referida al incendio de Buñol, así como la cartografía de dicho incendio obtenida a partir de un sensor de mayor resolución como TM, a bordo de la serie Landsat. Los resultados de dicha verificación espacial pueden observarse en la figura 4.

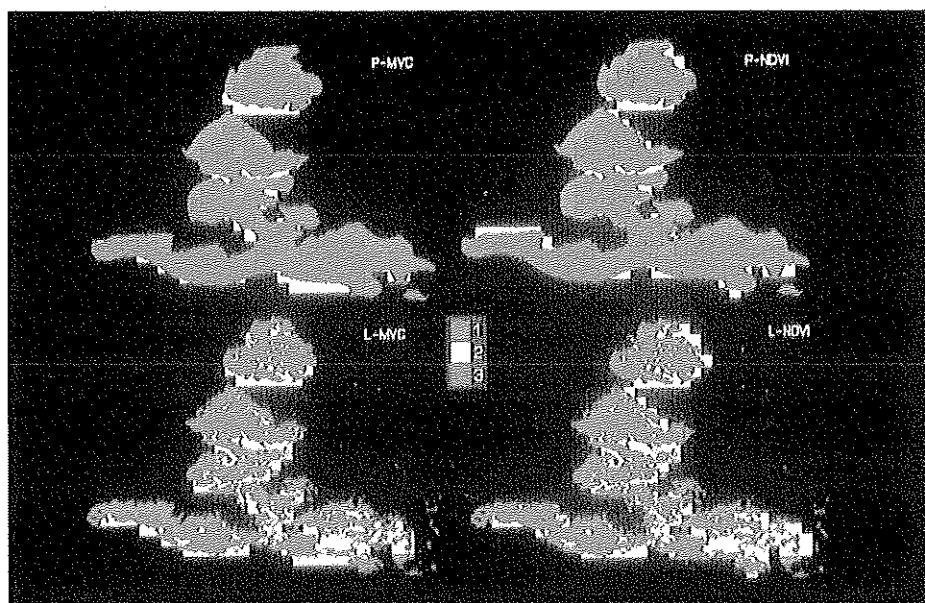


Figura 4

Verificación espacial de resultados. La categoría 1 representa los píxeles identificados como incendios en la imagen TM y en el perímetro, pero que no coinciden con la estimación de la imagen NOAA. La categoría 2, en cambio, representa los píxeles que se consideraron como incendios en la imagen NOAA, pero que no lo fueron en la imagen TM y el perímetro. Por último, la categoría 3, representa los píxeles coincidentes entre ambas estimaciones. (A. 36)

En un primer análisis cualitativo, podemos observar que la imagen Landsat delimita con mayor precisión el perímetro del incendio que las NOAA, discriminando aquellas zonas que no se quemaron dentro del mismo, como incendios anteriores, márgenes de arroyos, ríos y zonas no forestales que no sufrieron daño. De este análisis cualitativo se deduce, igualmente, que, en líneas generales, el perímetro obtenido a partir de las imágenes NOAA, se ajusta bastante bien al delimitado por ICONA. Para ambas comparaciones parece evidente una mayor coincidencia con la estimación del área quemada a partir de los NDVI diarios, frente a los MVC. Para comprobarlo hemos realizado una tabulación cruzada de estas imágenes (tabla 2). Efectivamente, los datos confirman nuestra primera estimación, pues la coincidencia entre Landsat y NDVI diarios es del 60,45%, es decir, más de un 5% superior al ajuste entre Landsat y MVC. Los resultados de la comparación son incluso mejores en el caso del perímetro del ICONA (un 61,53% en el caso de los MVC frente a un 68,11% con los NDVI diarios). Esta información ratifica la idea, que ya apuntábamos en el epígrafe anterior, de que la comparación entre índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes diarias (anterior y posterior al evento) ofrece mejores resultados que la

	Comparación LANDSAT- MVC	Comparación LANDSAT- NDVI		Comparación PERÍMETRO- MVC	Comparación PERÍMETRO- NDVI
NOAA (1)	20,09%	21,56%	NOAA (1)	6,51%	6,65%
LANDSAT (2)	24,08%	17,99%	PERÍMETRO (2)	31,96%	25,24%
LANDSAT/ NOAA (3)	55,83%	60,45%	PERÍMETRO/ NOAA (3)	61,53%	68,11%

Tabla 2

Estadísticas de la verificación espacial de los resultados

comparación de MVCs para la cartografía y evaluación de áreas quemadas con imágenes NOAA. Es importante, en este caso, que se trate de imágenes poco afectadas por distorsiones atmosféricas y cercanas al nadir, para evitar, en lo posible, que el valor del NDVI se vea afectado por otros elementos que no sean la propia respuesta de las distintas cubiertas.

Los valores de coincidencia no deben interpretarse, en sentido estricto, como las cifras de exactitud de la estimación del área quemada, ya que –como hemos comentado– puede haber desplazamientos geométricos entre imagen y perímetro que debiliten la comparación. Así, la estimación de superficies ha resultado ser mucho más certera (95% para los NDVI diarios y 88% para los MVC) que la espacial. No obstante, esta última, nos permite comprobar que existe un buen ajuste entre el perímetro general del área afectada por el fuego estimado con las imágenes NOAA, y los datos obtenidos para la verificación a partir de información auxiliar.

En definitiva, se confirma la validez de esta metodología para abordar este tipo de estudios, teniendo en cuenta las ventajas que se derivan de su utilización, como la rapidez y el bajo coste de las estimaciones.

Seguimiento de la evolución espacial del incendio

Como ya comentamos en el epígrafe anterior, a partir de la discriminación diaria de los píxeles quemados, se ha obtenido la figura 3, que recoge la evolución de la superficie quemada para las fechas sobre las que disponíamos de imágenes AVHRR. La primera imagen utilizada, que corresponde al día 29, fue adquirida 20 horas después del inicio del fuego, cuando existía un único foco activo. En el siguiente día se aprecian los efectos de un nuevo foco localizado al suroeste, al tiempo que se hacen evidentes los efectos del viento sobre la propagación del incendio que avanza hacia el norte y el este. La imágenes nocturnas correspondiente al 3 y 4 de agosto muestran un nuevo foco localizado en la Sierra de la Cabrera (al norte). Como puede observarse, la progresión del incendio coincide netamente con la delimitada por el ICONA en su informe, que hemos reproducido en la esquina superior izquierda de la figura 3,

aunque aquí se incorpora información de otras fechas. Si hubiera sido posible reconstruir la serie completa del incendio, tendríamos aún mejor delimitada la evolución del mismo. No obstante, se puede apreciar claramente la influencia que algunos factores como la topografía, la presencia de vías de comunicación, ríos y embalses y la propia cubierta vegetal tuvieron sobre la propagación del fuego. Así, por ejemplo, el trazado de la carretera Nacional III, impidió que se unieran los dos focos principales evitando que el incendio alcanzase mayor extensión. Por otra parte, la existencia de embalses como el de Forata (al sur), y de pequeños valles interiores, dio al perímetro final del incendio esa forma característica, pues en algunas de estas zonas el frente de llamas se extinguió de forma espontánea, mientras que en otras se extendió más uniformemente, al no mediar barreras. Por último, es posible observar que, en aquellas zonas donde la cubierta vegetal era homogénea (áreas forestales), el incendio se extendió con mayor facilidad; en cambio, en las zonas donde existía una ruptura de esa homogeneidad (zonas agrícolas) se frenó el avance del fuego. Así en la zona inferior de la imagen, dentro todavía del perímetro del incendio, podemos observar una zona que no sufrió daño, por estar ocupada por cultivos.

Esta información puede ser de gran utilidad de cara a verificar la eficacia de los programas de simulación del comportamiento del fuego. Estos programas pretenden predecir el comportamiento de un incendio a partir de unas ecuaciones teóricas sobre las relaciones entre los tipos de combustible ardiendo, la topografía y el viento locales. Las series diarias de imágenes AVHRR pueden facilitar una información muy valiosa para este tipo de programas, al mostrar, con suficiente detalle, la dimensión espacial del crecimiento de un incendio. Como es lógico, este tipo de estudios sólo resultará válido para el caso de grandes incendios, con un desarrollo temporal suficientemente prolongado.

Conviene anotar, por último, que no tenemos constancia de que se hayan abordado previamente este tipo de estudios, ya que las aplicaciones de las imágenes obtenidas por el canal 3 del AVHRR se han centrado, como ya comentamos, en la detección y la cartografía de incendios, pero no se habían utilizado hasta ahora para su seguimiento espacial.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado el interés de la información obtenida a partir del canal 3 de este sensor para seguir la evolución espacial de los grandes incendios, si bien es obvio que el ejemplo aquí analizado resulta bastante excepcional por su tamaño. No obstante, puede aportar información y elementos de juicio interesantes para el mejor conocimiento de las relaciones entre las distintas variables geográficas (topografía, viento, vegetación) en el desarrollo de eventos de esta magnitud. En el

terreno metodológico, es preciso destacar los problemas derivados de la ausencia de algunas imágenes en la serie analizada, debido a problemas de cobertura nubosa.

En lo que respecta a la cartografía y evaluación de áreas quemadas, 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. Para el incendio de Buñol el ajuste entre las estadísticas del ICONA y los resultados obtenidos a partir de la comparación de las imágenes diarias fue superior al 95%. El ajuste disminuye hasta el 68% si consideramos la dimensión espacial (comparación con el perímetro quemado), si bien no se han subsanado convenientemente, los problemas de ajuste geométrico entre documentos.

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 analizado en el capítulo anterior, el 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 incendio disponibles en el ICONA.

Se ha demostrado que la resta 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 podemos considerar el primer método como el más apropiado para realizar la cartografía y evaluación de áreas quemadas. En la verificación estadística de los resultados este procedimiento alcanzó un ajuste superior al 95%, mientras que a partir de los MVC se llegó al 88%. Estas diferencias se mantienen en la verificación espacial de los resultados. En esta ocasión el ajuste fue superior al 68%, en el caso de las imágenes diarias, e inferior al 62% en el de los MVC.

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 en Valencia y el informe sobre el incendio de Buñol, realizado por D. Rafael Currás, fue de gran ayuda para la verificación de los resultados. Las empresas AURENSA e INFOCARTO S.A., prestaron igualmente su colaboración en la lectura de las imágenes NOAA.

Bibliografía

- Abel, P.:** 1990. Prelaunch calibration of the NOAA-11 AVHRR visible and near IR channels. *Remote Sensing of Environment*. 31: 227-231.
- Belward, A.S.:** 1991. Remote sensing for vegetation monitoring on regional and global scales. En *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*. A.S. Belward y C.R. Valenzuela (Eds.). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. pp. 169-187.
- 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: 19-27.
- Chuvieco, E. y Congalton, R.G.:** 1988. Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International*. 3: 41-53.
- Chuvieco, E. y Martín, M.P.:** 1993. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. (En prensa).
- Dozier, J.:** 1981. A method for the satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution *Remote Sensing of Environment*. 11: 221-229.
- ESA-EPO:** 1992. *SHARP User's Guide*, Frascati, European Space Agency.
- Flannigan, M.D. y Vonder Haar, T.H.:** 1986. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*. 16: 975-982.
- Hitehcock, H.C. y Hoffer, R.M.:** 1974. *Mapping a Recent Forest Fire with ERTS-1 MSS Data*. LARS Information Note 032674. West Lafayette.
- Holben, B.N.:** 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. Journal of Remote Sensing*. 7: 1.417-1.434.
- Holben, B.N., Kaufman, Y.J. y Kendall, J.D.:** 1990. NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration. *International Journal of Remote Sensing*. 11: 1.511-1.521.
- Hougham, A.M.:** 1987. *Use of NOAA-AVHRR Digital Satellite Data for Precipitation and Forest Fire Assessment*. Saskatoon. Saskatchewan Research Council.
- Icona:** 1993. Los incendios forestales en España durante 1991, Madrid, M.A.P.A.
- Isaacson, D.L., Smith, H.G. y Alexander, C.J.:** 1982. Erosion hazard reduction in a wildfire damaged area. En *Remote Sensing for Resource Management*. Johannsen y Sanders (Eds.). Ankeny. Soil Conservation Society of America. pp. 179-190.
- 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: 371-377.
- Jijia, Z. et al.:** 1989. Detection of forest fires in Da Hinggan Ling region by meteorological satellite, *Acta Meteorologica Sinica*. 3: 562-568.
- Kasischke, E.S. et al.:** 1993. Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*. 45: 61-71.
- Kidwell, K.B.:** 1991. *NOAA Polar Orbiter Data Users Guide* NOAA/NESDIS. Washington D.C.
- 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. *International Journal of Wildland Fire*. 2: 21-36.
- Malingreau, J.P.:** 1984. Remote sensing and disaster monitoring, a review of application in Indonesia En *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.
- Matson, M. y Dozier, J.:** 1981. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47: 1.311-1.318.
- Matson, M. y Holben, B.:** 1987. Satellite detection of tropical burning in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 8: 509-516.
- Minick, G.R. y Shain, W.A.:** 1981. Comparison of satellite imagery and conventional aerial photography in evaluating a large forest fire. En *Proc. 7th Inter. Symp. Machine Processing of Remot. Sen. Data*. West Lafayette. pp. 544-546.
- Pereira, A.C., Setzer, A.W. y Dos Santos, J.R.:** 1991. Fire estimates in savannas of central Brazil with thermal AVHRR/NOAA calibrated by TM/Landsat. En *Proc. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Río de Janeiro. pp. 825-836.
- Setzer, A.W. et al.:** 1988. *Relatorio de Actividades do Projecto IBDF-INPE 'SEQE'*. Inst. Nacional de Pesquisas Espaciais. Sao Jose dos Campos.
- Setzer, A.W. y Pereira, M.C.:** 1991a. Operational detection of fires in Brazil with NOAA-AVHRR. *Proc. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Río de Janeiro. pp. 469-482.
- Setzer, A.W. y Pereira, M.C.:** 1991b. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. *Ambio*, 20: 19-23.
- 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: 97-112.
- Tanaka, S., Kimura, H. y Suga, Y.:** 1983. Preparation of a 125.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island. *International Journal of Remote Sensing*, 4: 17-31.