

DETECCIÓN DE SUPERFICIES FORESTALES QUEMADAS EN CATALUÑA MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE DURANTE EL PERÍODO 1975-1995. APLICACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE INCENDIOS Y LOS PROCESOS DE REGENERACIÓN DE LA VEGETACIÓN

Ricardo Díaz-Delgado¹, Raimon Salvador¹, Jordi Valeriano¹ y Xavier Pons^{2,1}

¹ C.R.E.A.F. (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals)
Fac. Ciències. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra

² Departament de Geografia
Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra

Resumen: En este trabajo se presenta la metodología desarrollada para obtener las superficies forestales quemadas en Cataluña a partir de una serie temporal de imágenes MSS del satélite Landsat (período 1975-1993). A esta serie se han añadido dos años más a partir de imágenes TM (1994-1995). Los resultados obtenidos en forma de mapa conforman la historia de fuegos del área de estudio durante 21 años, así como los niveles de recurrencia de incendio alcanzados. Los errores de omisión suponen un 23 % para las áreas quemadas mayores de 200 ha, mientras que los de comisión están en torno al 8 % para superficies quemadas mayores de 50 ha. Los resultados fueron incorporados en un sistema de información geográfica con objeto de caracterizar el régimen de fuegos de la zona de estudio. Se analiza la distribución de tamaños de incendios y el número de focos secundarios de incendio originados por cada fuego, así como la distancia máxima alcanzada con respecto al fuego principal. También, se muestran algunos aspectos del seguimiento de la regeneración a través del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Palabras clave: Landsat MSS, NDVI, reflectividad, modelo de regresión lineal, régimen de fuegos, regeneración, series temporales.

Abstract: This paper presents a semiautomatic methodology for fire scars mapping from a time series of Landsat MSS images over the forest surface of Catalonia (1975-1993). This series has been enlarged from two years of TM images (1994-1995). Results are a map series of fire history during 21 years as well as fire recurrence level. Omission errors are 23 % for burned areas greater than 200 ha while commission errors are 8 % for areas greater than 50 ha. Detected fire scars were incorporated into a geographic information system in order to characterise the fire regime of the study area. Fire size distribution and the number of spot fires originated from each fire as well as the maximum distance reached from the main fire are analysed. Some aspects about post-fire regeneration monitoring through normalised difference vegetation index (NDVI) are also shown.

Key words: Landsat MSS, NDVI, reflectance, linear regression model, fire regimen, regeneration, temporal series

INTRODUCCIÓN

Desde el año 1972 hasta la actualidad, el sensor MSS, embarcado en la serie de satélites Landsat, ha estado ofreciendo imágenes digitales de la superficie terrestre. A partir de 1975, las imágenes se obtenían ya de forma periódica cada 16-18 días. Este hecho, y su resolución espacial (60 x 80 m) le convierten en uno de los sensores de observación de la tierra de mayor interés para el seguimiento y estudio de la evolución del paisaje vegetal (Hall et al., 1991). Un ejemplo concreto de su aplicación es la caracterización del régimen de fuegos de zonas forestales (Minnich, 1983). En los ecosistemas mediterráneos el fuego determina en gran medida la estructura y la distribución espacial de las comunidades vegetales y de las especies vegetales (Johnson y Gutsell, 1994), si bien la estructura de la vegetación también marca, en cierto grado, la frecuencia y extensión de los incendios.

Existen diversos métodos para discriminar los cambios producidos por los incendios sobre las cubiertas vegetales, los cuales aparecen normalmente como repentinas disminuciones del recubrimiento vegetal y, por tanto, de su respuesta radiométrica. Algunos de los métodos más empleados son el análisis de componentes principales (Fung y LeDrew, 1987), la clasificación supervisada (Hall et al., 1991), el "Change Vector Analysis" (Lambin, 1996) y la resta de imágenes, que fue el empleado en este trabajo (Kasischke et al., 1993).

El proyecto de la CICYT AMB94-0881 tiene como último objetivo la caracterización del régimen de fuegos (intensidad, frecuencia, estacionalidad, extensión y tipo de incendio, Gill, 1975) de las comunidades vegetales mediterráneas de Cataluña y la determinación de su influencia en los procesos de regeneración.

METODOLOGÍA

Para abordar este estudio fueron adquiridas alrededor de un centenar de imágenes completas del sensor MSS (4 canales, 2 en el visible y 2 en el infrarrojo cercano) de los satélites Landsat 1, 2, 4 y 5, ya que para recoger toda la superficie de Cataluña en al menos dos momentos fenológicos distintos, se necesitan entre dos y tres escenas completas. Esta primera fase del proyecto ofrece como resultado de la metodología semiautomática desarrollada para la detección de superficies forestales quemadas, una cartografía de dichas superficies en el período 1975-93, así como los niveles de recurrencia de incendio.

Como segunda fase del proyecto, las áreas quemadas detectadas fueron integradas en un sistema de información geográfica (en adelante SIG), con el fin de facilitar la consulta y análisis estadístico de los patrones espaciales y temporales de ocurrencia de incendios en la región de estudio. De forma adicional, las superficies quemadas en los años 1994 y 1995 fueron añadidas a la base de datos con objeto de aumentar el período de estudio para la caracterización del régimen de fuegos de Cataluña. Paralelamente, varias superficies afectadas por incendios fueron seleccionadas para el estudio de la regeneración de la vegetación post-incendio por medio del seguimiento del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Detección de zonas quemadas

Todas las imágenes fueron corregidas geométrica y radiométricamente mediante los modelos de Palà y Pons (1995) y de Pons y Solé-Sugrañes (1994) además de practicar una normalización radiométrica de las diferentes bandas para realizar un ajuste fino entre ellas.

Mediante el método de la resta de imágenes se comparan los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de fechas sucesivas. El NDVI se calcula a partir de los canales espectrales rojo (canal 2) e infrarrojo cercano (canal 4) (Mather, 1987) (ecuación 1). El NDVI se relaciona directamente con la cantidad de biomasa verde de forma independiente a las especies vegetales que forman la comunidad (Gamon et al., 1995). La forma de obtenerlo se expone a continuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}}$$

Donde ρ son los valores de reflectividad del píxel en la banda del infrarrojo cercano y del rojo. Una vez aplicadas las máscaras de cultivos, de caducifolios, de nubes y de aguas continentales, las súbitas disminuciones del NDVI entre imágenes consecutivas de la serie multitemporal (altos valores en la resta de imágenes) fueron consideradas como zonas quemadas. Sin embargo, pudo observarse que la marcada fenología estival de la región mediterránea de estudio añadía superficies cambiantes pero no quemadas. Así, se optó por utilizar diversas áreas detectadas como quemadas (21) y validadas por los inventarios de incendios de la administración a fin de establecer los umbrales a partir de los cuales podían discriminarse con mayor precisión las zonas quemadas. Mediante un modelo de regresión lineal simple se ajustaron tres rectas, tal como se muestra en la fig. 1. En el gráfico se puede apreciar que existen dos umbrales, máximo y mínimo, de los

valores de diferencia de imágenes que se corresponden con un incendio, así como un umbral iterado generado por convergencia con todos los intervalos. A partir de estos datos se propusieron dos métodos, el método del umbral iterado (A) y el método de los umbrales mínimos y máximos (B), el cual facilita la detección marcando como "semillas" las áreas que más claramente se detectan como zonas quemadas (el umbral más restrictivo) y extendiéndolas a través de las áreas detectadas con el umbral menos restrictivo.

Los dos métodos fueron aplicados a todos los pares consecutivos de subimágenes, ya que el mosaico total de imágenes fue dividido en 31 ventanas con un tipo de vegetación y unas condiciones ambientales semejantes. Cada umbral discriminó las súbitas disminuciones del valor de NDVI. El tamaño mínimo de área quemada considerado fue de 30 ha (ver Salvador et al., 1997).

Los resultados fueron evaluados estadísticamente mediante fuente independiente para la cuantificación de los errores de omisión y comisión (Chuvieco, 1996), con el fin de obtener los porcentajes de acierto de los métodos empleados.

Integración en el SIG y análisis espacio-temporales

Una vez aplicados ambos métodos, los resultados fueron verificados como se describe en el siguiente apartado, y el método que ofreció la mejor discriminación de zonas quemadas (el B) fue seleccionado para la elaboración de un SIG en formato vectorial topológicamente estructurado susceptible de consulta y análisis (Salvador et al., 1998). Así, diferentes capas de información auxiliar pudieron ser superpuestas y cruzadas con la base de datos de ocurrencia y frecuencia de incendios con objeto de analizar las posibles relaciones existentes con diferentes parámetros ambientales considerados de relevancia.

La identidad de cada zona quemada detectada entre dos imágenes fue otorgada según las distancias entre manchas ≤ 1 km, en base a la distancia máxima de "spotting" esperada para comunidades forestales mediterráneas (algunos centenares de metros, Trabaud, 1992) y en función de la máxima distancia de focos secundarios o "spots" observada para todos los fuegos ocurridos en 1994 y 1995 en Cataluña = 1140 m (incendio de la comarca del Berguedà del 4 de Julio de 1994, con un total de 38976 ha quemadas). Ciertas variables referentes a la máxima distancia y el número de focos secundarios, así como el número de islas de vegetación dentro del fuego y sus tamaños, están siendo analizadas en la

actualidad con objeto de caracterizar las relaciones con el área quemada total de cada incendio.

Los focos secundarios o "spots"

De forma preliminar, las zonas detectadas como quemadas y aledaños al perímetro principal de cada fuego, los denominados focos secundarios o "spots", han sido estudiados en función de su relación con el tamaño del fuego. Así, para cada fuego se contabilizó el número de "spots" y se calcularon las distancias de cada uno de ellos al fuego principal. De éstas, se retuvieron únicamente las máximas de cada incendio.

Seguimiento de la regeneración

Para evaluar la variabilidad de la respuesta de las comunidades vegetales al fuego, varias zonas quemadas fueron empleadas para el seguimiento de los procesos de regeneración. Tres variables fueron consideradas para el estudio de la tasa de recuperación de la vegetación después del incendio: el valor promedio de NDVI de la zona quemada, la desviación típica de los valores de NDVI de la zona afectada, y el cociente entre los valores promedio de NDVI de las zonas quemadas y las zonas testigo no quemadas (Q_{NDVI}) de similar variación fenológica y composición específica dominante antes del fuego. La selección de las zonas se efectuó a un gradiente N-S y E-O de precipitación, al substrato litológico de la zona afectada, el tipo de vegetación previa y por último la altitud, pendiente y orientación de las 10 zonas escogidas (Díaz-Delgado et al., 1998). De forma empírica se ajustaron varios modelos de regresión logarítmicos entre los cuales fue posible establecer comparaciones y correlaciones con los parámetros ambientales mencionados.

RESULTADOS

Evaluación estadística de la metodología empleada

Para evaluar los resultados se contrastaron los resultados obtenidos para cada método con los ofrecidos por los inventarios de incendios elaborados por el Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca (DARP) desde el año 1983, los cuales disponen de la localización de cada fuego por municipio. La validación estadística muestra el porcentaje de error de omisión (incendios contemplados por el DARP pero no detectados por los métodos desarrollados) y el porcentaje de error de comisión (superficies no

quemadas y añadidas). Las gráficas muestran la variación del porcentaje de acierto de cada método con respecto al tamaño mínimo considerado. El método A (ajuste iterado) ofrece, para todas las superficies quemadas mayores o iguales a 30 ha, un porcentaje de acierto mayor que el B (53.4 % y 43.6 % respectivamente). Sin embargo, para incendios mayores de 200 ha, ambos mantienen un 78 % de acierto. Con respecto a comisión, el más certero parece ser el B, con un porcentaje de acierto del 91.1 %, a diferencia del A (menos restrictivo) con un 75.7 % (ver Díaz-Delgado et al., 1997). Esto es debido en gran medida al gran efecto fenológico que se produce en ciertas comunidades arbustivas laxas durante el período estival.

Conforme a las superficies detectadas como quemadas por el método B, la tabla 1 muestra el área total afectada en relación con la recurrencia de incendios, así como el porcentaje con respecto a la superficie forestal total, para el período 1975-93.

Posteriormente se añadió a los resultados la cartografía de las áreas incendiadas en los años 1994 y 1995, que en este caso fue proporcionada por el DMA e ICC (Departament de Medi Ambient e Institut Cartogràfic de Catalunya), con lo que se amplió la serie temporal desde 1975 hasta 1995 (21 años). La distribución de tamaños de fuegos fue analizada a través de la distribución de frecuencias de los tamaños de incendios así como a través del porcentaje del área quemada por cada incendio y todos los menores que él respecto a su tamaño relativo (definido como el porcentaje respecto al mayor incendio), siguiendo un esquema similar al de Minnich y Chou (1997) (ver Figura 2).

Tamaños de incendio

En la figura 1, la curva A muestra el número de fuegos ocurridos en Cataluña entre 1975 y 1995 ordenados por tamaño. En ella se aprecia que los grandes incendios son infrecuentes. En la curva B, donde

en el eje de abscisas el 100% representa el mayor fuego ocurrido en 1994, con una superficie afectada entorno a las 40.000 ha, se aprecia que casi el 70% del área quemada total es debida a incendios menores de 8.000 ha (20%) y que el 50% a tamaños por debajo de 4.000 ha (10%). El tamaño medio de fuego es de 645,1 ha, el valor estadístico de la mediana, 133,2 ha, y el valor más frecuente o moda, 35,6 ha.

Focos secundarios de los fuegos del 94 y 95: número y distancia máxima

A primera vista y de manera obvia, en la figura 2, puede observarse una estrecha relación entre el tamaño del fuego y el número de focos secundarios generados por éste, y a su vez con las máximas distancias alcanzadas por los "spots" con respecto al perímetro del fuego principal. Con posterioridad se pretende estudiar la misma relación con todos las zonas quemadas detectadas entre 1975 y 1993.

Seguimiento de la regeneración

En la figura 3 puede observarse el tipo de gráfico resultado obtenido para cada una de las zonas seleccionadas. En este caso concreto, se corresponde con un incendio de 700 ha ocurrido el 10 de febrero de 1984 en el municipio de Tordera (Barcelona) y que afectó en su mayor parte a una zona cubierta por alcornocal. El tiempo calculado mediante el modelo para alcanzar el valor promedio estacional previo al incendio es bastante menor que para otras áreas afectadas cubiertas por vegetación dominante no rebrotadora, sin duda indicando la importancia de la historia previa del área analizada (Christensen, 1993). Sin embargo, los niveles de recuperación alcanzados a un tiempo constante para todas las series ($t=2544$ días, serie más corta) por el Q_{NDVI} no pudieron ser correlacionados con ninguno de los parámetros ambientales considerados en el estudio.

Tabla 1: Superficies totales afectadas por nivel de recurrencia de incendio en Cataluña y porcentaje con respecto al área forestal (tamaño de incendio ≥ 30 ha, período 1975-93, método de umbrales máximos y mínimos). Fuente: Salvador et al., 1998.

Nivel de recurrencia	Superficie quemada (ha)	% de la superficie forestal
Una vez	111009	5.7
Dos veces	14506	0.74
Tres veces	1532	0.078
Cuatro veces	396	0.02
Cinco veces	67	0.0034

DISCUSIÓN

La figura 4 muestra una zona del mapa de los resultados obtenidos con el método de umbrales máximos y mínimos (el más preciso) y las frecuencias de incendio para cada superficie afectada por un fuego en el Cabo de Creus. Algunos factores parecen influir en el acierto de los métodos, tales como la moderada disponibilidad de

imágenes, la imposibilidad de trabajar con imágenes de las mismas fechas, la marcada fenología estival de ciertas cubiertas vegetales, la recuperación rápida de la vegetación después del fuego, la radiometría de los suelos, la deriva de los factores de calibración de los diferentes sensores empleados para todo el período (si bien la normalización lineal aplicada a toda la serie corrige este efecto), las diversas intensidades de fuego y por último, las actuaciones silvícolas, todas ellas como fuente de confusión.

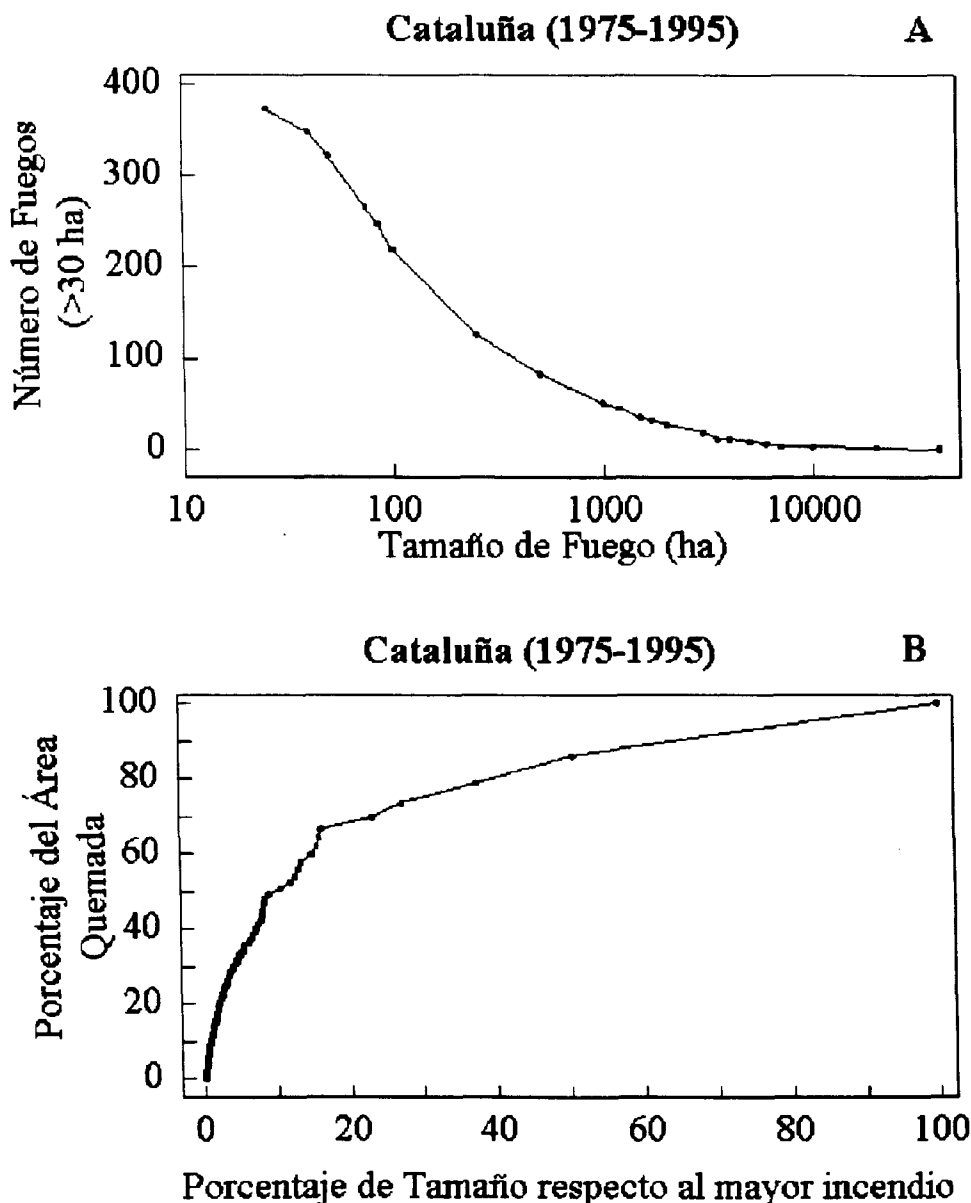
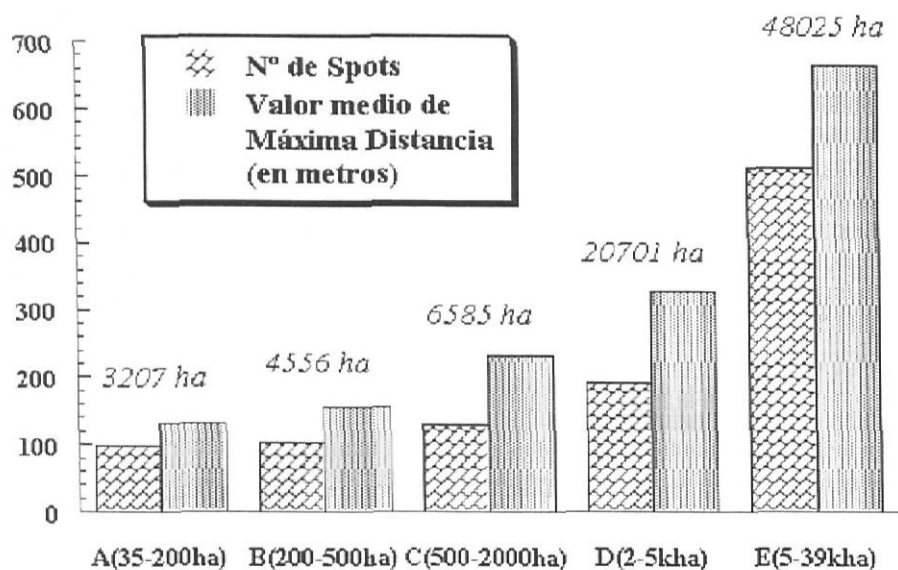


Figura 1. Distribución de tamaños de fuegos ocurridos en Cataluña (período 1975-95). En A se muestra la distribución de frecuencias de los tamaños de incendios. En B se muestra el porcentaje del área quemada por cada incendio y todos los menores que él (eje Y) respecto a su tamaño relativo, definido como el porcentaje respecto al mayor incendio.



Clase de tamaño (incendios de 1994 y 1995 > 35 ha)

Figura 2. Número de focos secundarios ("spots") y valor medio de máxima distancia alcanzada (en metros) con respecto a las clases de tamaño de incendios ocurridos en 1994 y 1995. En cursiva figura el área total quemada por cada clase de tamaño.

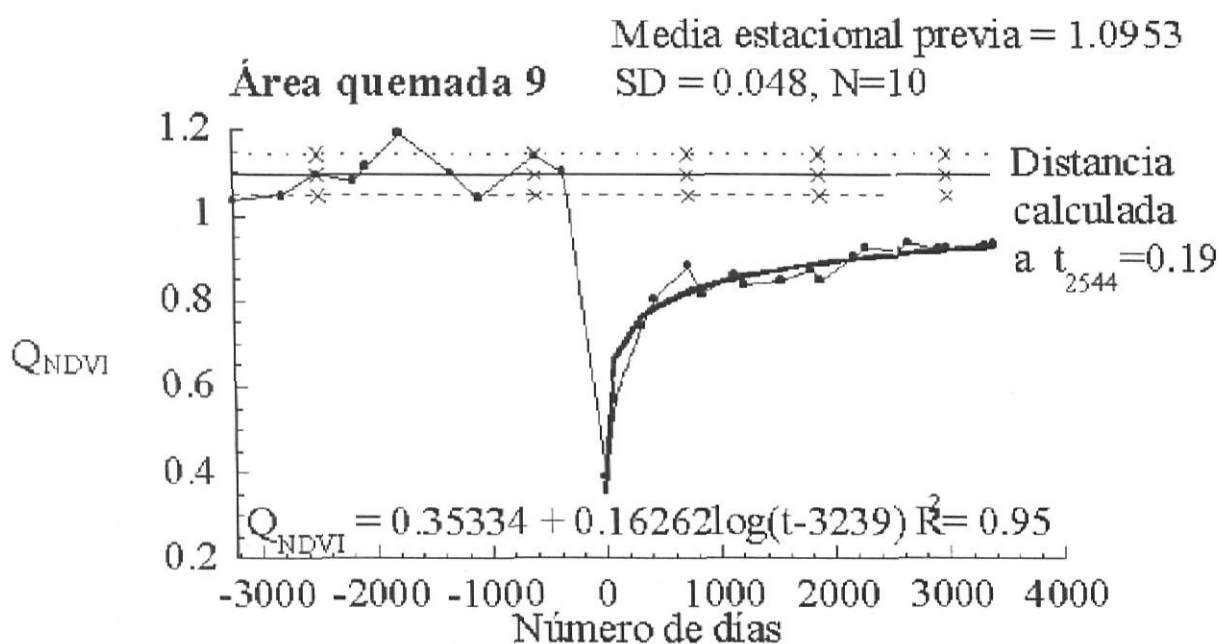


Figura 3. Gráfica tipo del seguimiento de Q_{NDVI} (promedio NDVI zona quemada/ promedio NDVI zona control) antes y después del incendio. El modelo logarítmico ajustado permite el cálculo de la distancia a la media estacional previa en el tiempo t_{2544} común a todas las series analizadas (valor de la serie más corta) y la comparación entre series (ver Díaz-Delgado et al.).

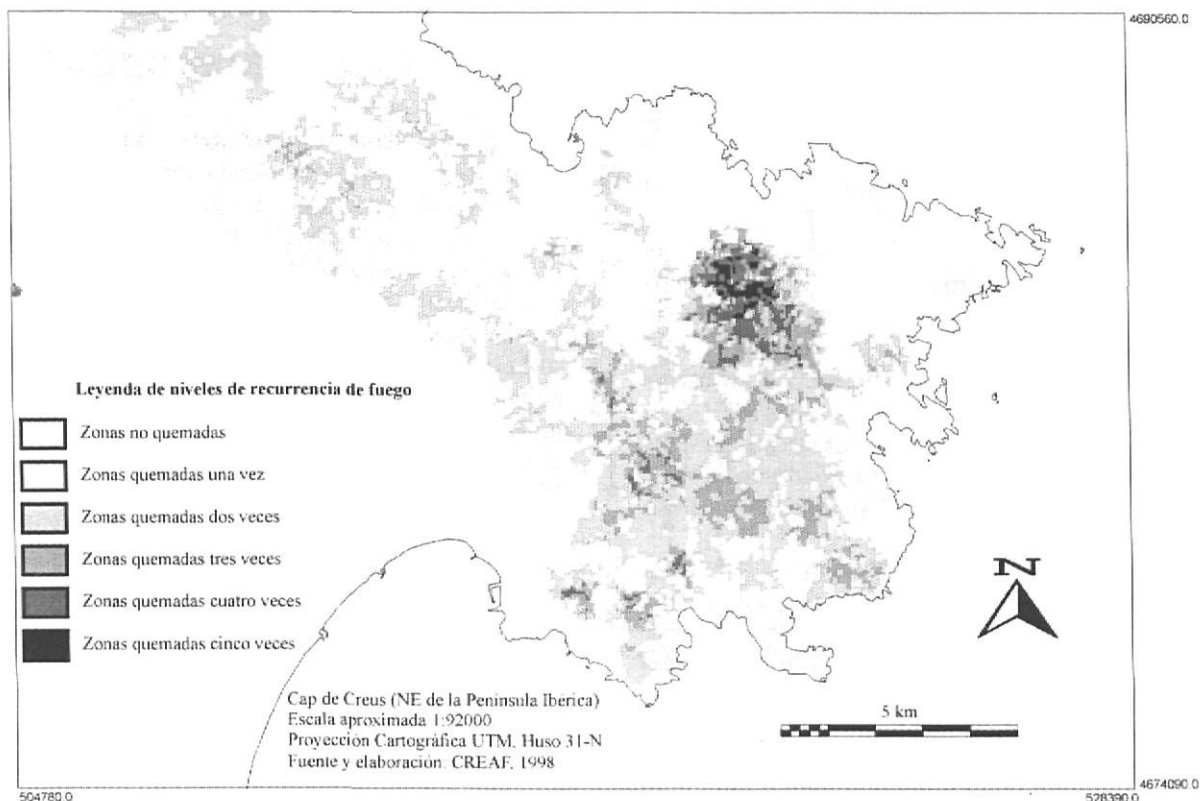


Figura 4. Mapa de zonas forestales quemadas y frecuencia de incendios en el Cabo de Creus para el período 1975-95. Se representan sólo superficies quemadas mayores de 30 ha.

Aún así, los modelos aplicados (Figura 5) fueron desarrollados para minimizar todos los efectos mencionados mediante la elección de los umbrales de detección de los incendios. Con respecto al seguimiento de la regeneración post-incendio de las áreas seleccionadas es interesante resaltar la importancia de considerar el intervalo de variación fenológica previa al incendio que muestra la zona de estudio en trabajos similares. Tal rango de variación puede ser usado como referencia para determinar el nivel máximo esperado de recuperación de la vegetación (por medio del cociente entre NDVIs) que se alcanzará en el proceso de regeneración post-incendio (Malingreau et al., 1985). Este aspecto puede resultar de utilidad en estudios basados en cronosecuencias después del fuego (García y Sabaté, 1996).

Según el patrón espacial observado de distribución de tamaños de fuego, es interesante resaltar la importancia de los grandes incendios sobre la superficie quemada total en Cataluña. Así, el 8% de los incendios ocurridos entre 1975 y 1995 fueron grandes incendios (tamaño superior a 2000 ha), los cuales quemaron prácticamente el 80% de la superficie total ardida en el período estudiado. Sin duda, el hecho de considerar la proporción de área quemada atribuida a las diferentes clases de tamaños

de incendios puede ser de ayuda a la hora de asignar recursos a la prevención y supresión de acuerdo con la variabilidad regional observada en la distribución espacial de tamaños (Strauss et al., 1989).

Por otro lado, la relación proporcional entre tamaño, número de focos secundarios y máxima distancia alcanzada, aunque obvia, permite corroborar la relación existente entre tamaño e intensidad del incendio, ya que a mayor energía emitida por un frente de fuego, mayores temperaturas alcanzadas y mayor la columna de convección capaz de transportar brizas y brasas (pedazos de corteza, escamas de piñas) incandescentes, y por lo tanto, mayor será la distancia que pueden alcanzar y seguidamente generar focos secundarios. De igual forma, el número de "spots" producidos como consecuencia de un fuego forestal intenso de dichas características aumentará. En la mayoría de los casos, los fuegos intensos van a corresponder a incendios de copa y dirigidos por vientos fuertes. Parece pues, factible, utilizar esta información como accesoria para clasificar los tipos de fuego y la intensidad que tuvo lugar *a posteriori*. En la actualidad, tal información está siendo combinada con otras variables de interés, como el valor de longitud máxima alcanzada por cada fuego, el cual está directamente relacionado con los vientos dominantes en el momento del

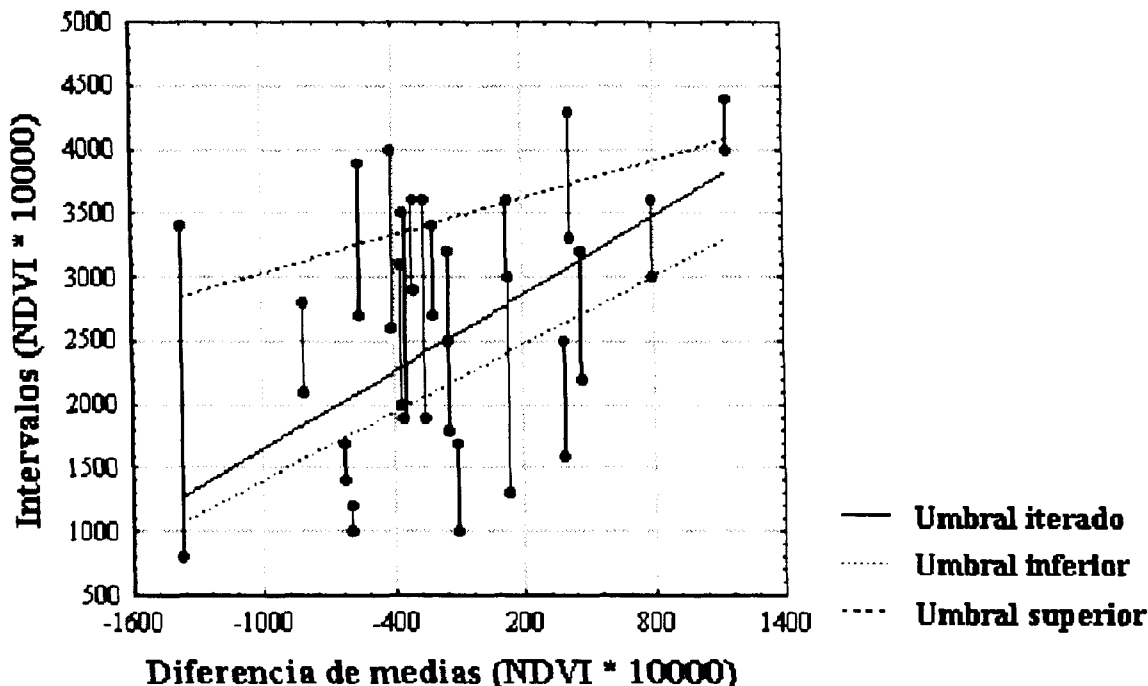


Figura 5. Intervalos de umbrales aplicables a cada uno de los 21 incendios utilizados para alimentar el modelo. Dichos intervalos se dan con relación a la diferencia de NDVI medio de las dos subimágenes entre las que se encontraba localizado el incendio.

incendio y con la distribución espacial del combustible. Esta información de relevancia permitirá completar la caracterización del régimen de fuegos de Cataluña en el período estudiado.

Por último, la posibilidad de actualización continua de la base de datos de incendios, permite aumentar la serie temporal analizada e incorporar anualmente los fuegos ocurridos con el fin de confirmar los diferentes grados de recurrencia, intensidad y tipo de incendio, tamaños de fuego y estacionalidad.

CONCLUSIONES

- Las imágenes de satélite poseen un elevado interés para la cartografía de zonas quemadas. En consecuencia, es posible emplearlas para la caracterización del régimen de fuegos de Cataluña en períodos de tiempo considerables (21 años en este caso).

- Los modelos lineales empleados se basan en la resta de los NDVI y utilización de umbrales. Los resultados obtenidos parecen ser aceptables una vez contrastados con los datos procedentes de la administración, si bien deben ser considerados como discrepancias en lo que respecta al porcentaje de acierto en superficie y no como

errores dada la dificultad de contabilizar la superficie quemada sobre el terreno.

- Con el método del umbral iterado, el porcentaje de acierto en omisión mejora, mientras que el método de máximos y mínimos umbrales lo hace en comisión.

- Diversos factores causan imprecisión en el método. Algunos pueden ser minimizados, como la fenología y la limitada disponibilidad de imágenes con una mayor resolución temporal. Otros, como las diferentes intensidades del fuego, los tratamientos silvícolas y la respuesta radiométrica de los suelos, no parecen ser tan abordables.

- La distribución de tamaños de incendios en Cataluña entre los años 1975 y 1995, muestra una gran aportación (80%) al área total quemada por grandes incendios (>2000 ha) que en número no superan el 8% del total de los ocurridos.

- El número de focos secundarios y la máxima distancia alcanzada están directamente relacionados con el tamaño del incendio y, muy probablemente, con la intensidad y el tipo de fuego.

- La respuesta al incendio de las comunidades vegetales afectadas puede ser monitorizada y modelizada a través de las variaciones del NDVI, con el fin de determinar las diferentes tasas de recuperación en función de las características ambientales del área afectada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Institut Cartogràfic de Catalunya la ayuda ofrecida en el proceso de la corrección geométrica de las imágenes, al Departament de Medi Ambient (DMA, Generalitat de Catalunya) por la información suministrada referente a los fuegos de 1994 y 1995, al Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca (DARP, Generalitat de Catalunya) y al antiguo Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) por los inventarios de incendios proporcionados. Este proyecto ha sido financiado por la Comisión Interdepartamental de Ciencia y Tecnología (CICYT AMB94-0881), el proyecto LUCIFER EC (ENV-CT96-0320), por una beca de la Generalitat de Catalunya a Raimon Salvador y una beca de F.P.I. del Ministerio de Educación y Cultura a Ricardo Díaz-Delgado.

REFERENCIAS

Christensen, N. L. (1993). Fire Regimes and Ecosystem Dynamics. *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric, and Climate Importance of Vegetation Fires*. (P.J. Crutzen y J. G. Goldammer, eds.) John Wiley & Sons, New York: 233-244.

Chuvieco E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial*, (3ª ed.). Madrid, Rialp.

Díaz-Delgado, R., Salvador, R. y Pons, X. (1998). Monitoring of plant regeneration after fire by remote sensing. *Fire Management and Landscape Ecology*. (L. Trabaud, ed.) International Association of Wildland Fire, Fairfield: 315-326.

Díaz-Delgado, R., Salvador, R., Valeriano, J. y Pons, X. (1997). Resultados y evaluación estadística de un método automático de detección de superficies forestales quemadas en Cataluña (período 1975-1993). *VII Congreso Nacional de Teledetección*. Santiago de Compostela: 215-218.

Fung, T. y Le Drew, E. (1987). Application of principal components analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 12: 1649-1658.

Gracia C. y Sabaté, S. (1996). Canvis en l'estructura de la vegetació. *Ecologia del foc*. Barcelona (Ed. Proa). 162-172.

Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K. L., Hartley A. E., Joel G., Peñuelas, J. y Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5: 28-41.

Gill, A. M. (1975). Fire and the Australian Flora: a review. *Australian Forestry* 38:4-25.

Hall, F. G., Botkin, D.B., Strelbel, D.E., Woods K. D. y Goetz, S. J. (1991). Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology* 72: 628-640.

Johnson, E. A. y Gutsell, S. L. (1994). Fire frequency models, methods and interpretations. *Advances in Ecological Research* 25: 239-283.

Kasischke, E. S., French, H. F., Harrell, P., Christiensen, 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: 61-71.

Lambin, E. F. (1996). Change detection at multiple temporal scales: seasonal and annual variations in landscape variables. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62: 931-938.

Malingreau, J. P., Stephens, G. y Fellows, L. (1985). Remote sensing of forest fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio* 14: 314-321

Mather, P. M. (1987). *Computer processing of remotely-sensed images*. New York, John Wiley & Sons.

Minnich, R.A. (1983). Fire mosaics in Southern California and Northern Baja California. *Science* 219: 1287-1294.

Minnich, R.A. y Chou, Y.H. (1997). Wildland fire patch dynamics in the chaparral of Southern California and Northern Baja California. *International Journal of Wildland Fire* 7: 221-248.

Palà, V y Pons, X. (1995). Incorporation of relief into a geometric correction based on polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 7: 935-944.

Pons, X. y Solé-Sugrañes, L. (1994). A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment* 48: 191-204.

Salvador R., Pons X., Valeriano, J., Romeu J. y Palà V. (1997). Un método de análisis de los incendios ocurridos en Cataluña durante el período 1975-1993 mediante imágenes de satélite. *VII Congreso Nacional de Teledetección*. Santiago de Compostela: 212-214.

Salvador, R., Díaz-Delgado, R., Valeriano, J. y Pons, X. (1998). Remote sensing of forest fires. *Proceedings of the GisPlaNet Congress*. Lisboa: documento 099 de la ed. digital en CD-ROM.

Strauss, D., Bednar, L. y Mees, R. (1989). Do one percent of forest fires cause ninety-nine percent of the damage?. *Forest Science* 35: 319-328.

Trabaud, L. (1992). *Les feux de forêts. Mécanismes, comportement et environnement*. Aubervilliers, France-Selection.