

INDICES DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES A PARTIR DEL NDVI Y LA TEMPERATURA DEL SUELO OBTENIDOS MEDIANTE IMAGENES NOAA

Pilar Illera, Alberto Fernández, José Antonio Delgado y Rosa Ana Hernández
Laboratorio de Teledetección, Dpto. de Física Aplicada I, Universidad de Valladolid
E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Avda de Madrid 57, 34004 Palencia
Tel: 979-729048, fax: 979 712099, e-mail: illera@cpd.uva.es

Palabras clave: peligro de incendios forestales, imágenes NOAA, índice de vegetación, índice de verdor, temperatura del suelo.

Resumen. Como parte de un sistema para la vigilancia operativa de incendios forestales a partir de datos proporcionados por los satélites de la serie NOAA, presentamos tres índices para la estimación del peligro de incendios asociado al estrés hídrico de la vegetación. Los dos primeros se basan en el análisis de la evolución temporal del índice de vegetación diferencia normalizada NDVI, mientras que el tercero se obtiene a partir de la relación entre el NDVI y la temperatura del suelo. En el presente trabajo se analizan los valores de los tres índices durante el periodo enero-septiembre de 1994. Para su determinación partimos de imágenes NOAA-11 captadas diariamente en el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV).

Dos de los índices presentados son calculados de forma operativa con frecuencia diaria en el LATUV, desde donde los enviamos a la Dirección General de Conservación de la Naturaleza durante los meses de peligro, en el marco de un convenio que se ha desarrollado durante los tres últimos años.

I. Introducción.

La cuenca mediterránea es un área propicia para los incendios forestales, debido a su clima seco y a la alta inflamabilidad de su vegetación. Prueba de ello es la gran cantidad de hectáreas arrasadas en el último quinquenio, de las cuales más de la mitad corresponde al año 1994, siendo de destacar la importancia de los grandes incendios en toda la zona.

El radiómetro AVHRR, a bordo de los satélites NOAA, proporciona imágenes con cinco bandas situadas en el rojo, infrarrojo próximo, infrarrojo medio y dos en el infrarrojo térmico. Las dos primeras miden la radiación solar reflejada por la tierra y se pueden combinar para el cálculo de índices de vegetación. Los dos canales térmicos proporcionan información sobre la radiación emitida por el suelo y se pueden utilizar para calcular su temperatura, todo ello con una resolución espacial de 1 x 1 km y disponiendo de varias imágenes a día. Todos estos datos resultan de gran utilidad para la vigilancia de incendios forestales a nivel regional. Nosotros hemos utilizado las

imágenes NOAA siguiendo tres líneas: vigilancia del estrés hídrico de la vegetación antes del incendio, detección automática de focos activos y cartografía automática de áreas quemadas [1].

Uno de los múltiples factores que influyen en el riesgo de incendio es la humedad de la vegetación. Su medida directa es un problema complejo que requiere un costoso muestreo espacial, por lo que se suele estimar a partir de índices calculados mediante variables meteorológicas. El empleo de satélites como los NOAA puede jugar un papel importante en este sentido, ya que proporcionan información sobre la vegetación que cubre todo el territorio y con una buena resolución temporal.

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos utilizando tres procedimientos. Los dos primeros se basan en el análisis de la evolución temporal del índice de vegetación diferencia normalizada o NDVI, cuya disminución se supone relacionada con la de la humedad de la vegetación [2], [3]. Como indicadores de peligro utilizamos la suma de pendientes de la curva de evolución temporal del NDVI desde la primavera a la época del incendio y el llamado índice de verdor que da una idea del valor relativo del NDVI con respecto al máximo y mínimo observados en cada pixel durante un periodo de tiempo. En cuanto al tercer indicador, se calcula a partir de la temperatura del suelo y del NDVI. Ambas magnitudes presentan una relación lineal negativa, cuya pendiente se cree que está relacionada con el cociente entre los flujos de calor sensible y latente, por lo que se puede utilizar como una medida de estrés hídrico en bosques [4]. Los indicadores se calculan para las Comunidades Autónomas de Cataluña, Aragón, Valencia, Castilla y León, Castilla la Mancha, Murcia y Andalucía. En el trabajo se analizan sus valores en zonas forestales y en áreas donde se han producido grandes incendios, todo ello en el año 1994, en el que éstos fueron muy frecuentes.

II. Datos.

Partimos de imágenes NOAA-11 captadas diariamente desde enero de 1993 a septiembre de 1994, mes en que dejó de operar el satélite, por el receptor HRPT de que disponemos en el LATUV. Las imágenes se preprocesan por medio de software propio. Con las reflectividades roja r1 e infrarroja próxima r2, calculamos los valores diarios del $NDVI = (r2 - r1) / (r2 + r1)$. Para evitar la influencia del

ángulo de visión y de las condiciones atmosféricas sobre el índice, los valores se combinan en los llamados compuestos de valor máximo CVM, en los que se recoge para cada pixel el máximo índice obtenido en un periodo de tiempo, que en nuestro caso es de 10 días. La combinación de las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 mediante el modelo desarrollado por Caselles y colaboradores en la Universidad de Valencia [5], nos proporciona diariamente la temperatura del suelo con errores del orden de 1°.

En cuanto a los datos sobre los incendios, contamos con los partes recogidos por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (antes ICONA). En ellos se presenta información diversa sobre cada incendio que ha tenido lugar en nuestro país, pero nosotros hemos utilizado únicamente la fecha, superficie afectada y localización dentro de la red de 10 x 10 km manejada en los partes. Dado que localizar de esta forma los incendios supone una imprecisión a la hora de superponer las zonas quemadas en las imágenes, hemos producido la cartografía de 35 grandes incendios de 1994 a partir de imágenes NOAA utilizando nuestro propio procedimiento automático [6].

Por último, para proceder al análisis de la evolución de los indicadores de peligro en zonas forestales hemos contado con cartografía digital. Disponemos en primer lugar de los datos del programa CORINE land cover que hemos degenerado para superponer a nuestras imágenes NOAA. Contamos también con un mapa de vegetación de la Comunidad de Valencia en que se recogen diversas clases forestales.

III. Evolución del NDVI y peligro de incendio.

El NDVI está relacionado con distintas variables fisiológicas como la radiación fotosintéticamente activa absorbida y el índice de superficie foliar. Se cree también que puede ser un indicador del contenido en agua de la vegetación. Si se analiza la evolución temporal del NDVI en zonas forestales, se pueden asociar las disminuciones del índice con las de la humedad de la vegetación y, por lo tanto, con aumentos del peligro de incendio. En este hecho se basan los dos indicadores que estudiamos en este trabajo.

Pendiente acumulada. Se trata de utilizar como indicador de peligro la suma de las pendientes de la curva de evolución del NDVI desde la primavera a la época previa al incendio:

$$PA_n = \sum_{t=1}^n \frac{NDVI(t_i) - NDVI(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

dónde t representa el día del año. Cuando el NDVI disminuye la pendiente será negativa. Esperamos pues valores negativos asociados a disminución del NDVI y,

por tanto, al peligro de incendio. El indicador se plantea de forma que se puede calcular disponiendo únicamente de imágenes de un año. En nuestro caso, calculamos la PA a partir de los compuestos de valor máximo del NDVI, por lo que disponemos de sus valores cada diez días desde marzo a mediados de septiembre. Estudios previos [7] llevados a cabo con datos de todo tipo de incendios de 1993 indican que la PA puede ser útil para estimar el peligro de grandes incendios.

Índice de verdor. En este caso se compara el NDVI de cada pixel con los valores máximo y mínimo registrados en el propio pixel durante un periodo de tiempo lo más largo posible:

$$IV_n = \frac{NDVI(t_n) - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}}$$

el verdor indica lo que se separa el NDVI de una fecha del mínimo histórico y su disminución se puede ligar a la de la humedad de la vegetación. Nosotros hemos calculado los índices de verdor desde enero a septiembre de 1994 a partir de los CVM, es decir con su frecuencia de diez días. Para calcular los NDVI máximos y mínimos hemos contado con datos de dos años, utilizando todos los CVM decenales del periodo enero 1993 a septiembre de 1994. En estas condiciones nuestros valores del IV variarán de cero a uno. Este indicador ha sido utilizado por diversos autores para estimar el peligro de incendio, en particular por el Servicio Forestal de los Estados Unidos [3].

A pesar de la dificultad a la hora de obtener conclusiones superponiendo los datos de incendios y el indicador de peligro debido a uno sólo de los múltiples factores, presentamos los resultados obtenidos al analizar el valor de la PA y el IV para los 35 grandes incendios (>= 1000 ha) que hemos cartografiado mediante imágenes NOAA. La superposición de las zonas quemadas con las imágenes nos permite asociar a cada incendio un valor representativo de los indicadores. La PA presenta, en general, valores negativos, pero sin una tendencia clara. El mismo problema surge con el índice de verdor.

Para profundizar en el análisis, estudiamos la evolución de los indicadores en las clases forestales que aparecen en los mapas de vegetación. En la figura 1 vemos un ejemplo para la Comunidad de Valencia. Se presenta la evolución de la PA desde marzo a septiembre para toda la Comunidad y el promedio de las clases correspondientes a pinos. Podemos concluir que las evoluciones presentan una tendencia similar y el resultado se repite para el resto de las clases forestales. Por tanto, los aumentos y disminuciones se producen para todas las clases de vegetación en una zona determinada. Con el índice de verdor obtenemos resultados similares.

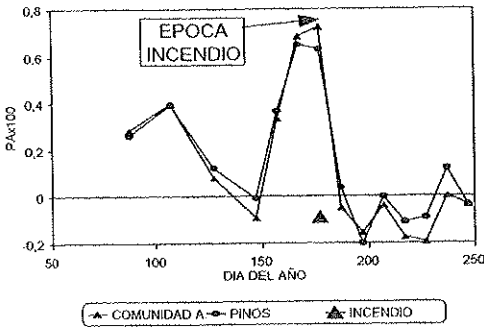


Figura 1

En la figura presentamos también el valor de la PA para un incendio que se produjo a primeros de julio. Vemos que aunque presenta un valor negativo del indicador, este no es bajo si se compara con los del resto del verano. En cambio el valor resulta muy bajo con respecto a los promedios en su propia época. Proponemos por tanto utilizar la distancia entre la PA del incendio y los valores medios de la época pesada por la desviación típica $PAT = (PA - media) / DT$. De la misma forma podemos obtener un verdor tipificado IVT, ya que los resultados para este indicador son muy similares.

En la figura 2 se muestran los valores de la superficie quemada frente a la PAT. Un valor de -1 en el indicador, que ya tiene características de índice, supone que la PA del incendio está un desviación típica por debajo del promedio de la época. Ahora la tendencia parece más clara. Si determinamos peligro para valores de la PAT menores o iguales que -1 obtenemos los resultados que aparecen en la tabla I. Resultados similares se obtienen con el IVT. Ambos parecen indicar que los indicadores pueden dar una idea de las zonas más propensas a sufrir incendios en una época determinada.



Figura 2

Por último, la figura 3 justifica el paralelismo de los resultados que encontramos para los dos índices de peligro. La relación se debe a que ambos están ligados a los incrementos o disminuciones del NDVI, aunque el aumento del periodo de estudio sería deseable antes de obtener más conclusiones.

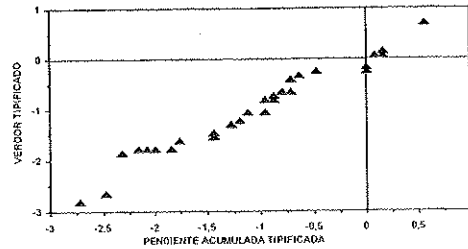


Figura 3

| | incendios (%) | superficie (%) |
|---------|---------------|----------------|
| PAT | 51 | 78 |
| IVT | 45 | 74 |
| Ts-NDVI | 63 | 81 |

Tabla I

IV. Relación Ts-NDVI y peligro de incendio.

La temperatura del suelo es uno de los elementos básicos que afectan al balance de radiación, ya que determina la radiación emitida y los flujos de calor sensible y latente. Dichos flujos, el balance radiativo y el propio valor de la temperatura, varían con la presencia o ausencia de vegetación y con la densidad de la cubierta. Como ya hemos indicado, varios autores han sugerido el uso de la relación entre la temperatura del suelo y la cantidad de vegetación medida mediante índices del tipo del NDVI como un indicador de estrés hídrico. Nosotros la hemos utilizado para estimar el peligro de incendio.

En la figura 4 podemos ver la citada relación en un sector de 20 x 20 km de la zona de estudio. Se observa una relación lineal de pendiente negativa, lo que indica que la temperatura disminuye cuando crece la densidad de la cubierta vegetal. Esto es debido en parte a la evapotranspiración. Se cree que la pendiente de la recta está relacionada con el estrés hídrico. Una pendiente mayor (en valor absoluto) indicaría un incremento en el estrés.

Para analizar la relación pendiente-peligro, la hemos calculado en sectores de 20 x 20 km siguiendo el procedimiento descrito por Nemani [8], en el que se eliminan las nubes y se procede a un procedimiento iterativo de filtrado. Trabajamos con imágenes diarias de

enero a septiembre de 1994, con una mayor cobertura de los meses de verano.

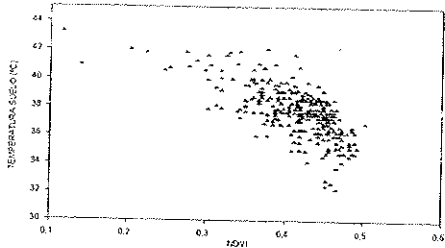


Figura 4

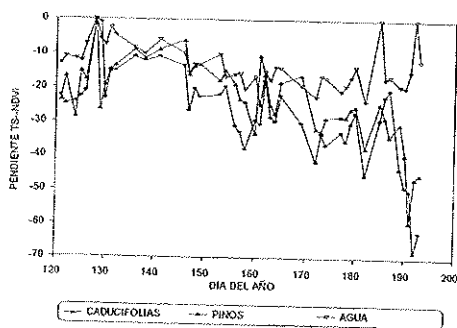


Figura 5

Como primer paso, analizamos los valores de la pendiente a lo largo de toda la época de estudio y para distintas clases forestales. Un ejemplo para la Comunidad de Valencia se presenta en la figura 5. No se observan diferencias claras entre los valores de la pendiente para las distintas clases forestales, resultado que se repite en el resto de los análisis. Los valores normales de la pendiente están entre -10 y -30. Los valores positivos corresponden a situaciones dónde no se puede realizar el ajuste en la celda por falta de datos ($N < 20$) o baja correlación ($r < 0,7$).

En la figura se observan también bruscos descensos de la pendiente asociados a determinadas épocas. Ligaremos estos descensos al aumento del estrés hídrico y del peligro de incendio. Si fijamos el umbral en el valor -30 para la pendiente y superponemos los datos de incendios y las imágenes obtenemos buena relación entre el indicador y la superficie quemada y los resultados globales que se reflejan en la tabla 3. Indicar que sólo se pudo analizar el 80% de los incendios que corresponden al 93% de la superficie quemada, ya que en el resto no se pudo calcular la pendiente. Los datos de la tabla corresponden al total de la muestra. Al contrario de lo que ocurre en el caso de los dos índices examinados antes, que dan las zonas con mayor peligro en una época, en este caso, el indicador parece útil para estimar el peligro de incendio a lo largo

del año. Su principal limitación es la dificultad de realizar el ajuste si hay situaciones nubosas en las zonas de 20 x 20 km. Decir, por último, que el índice no presenta una relación clara con los otros dos en las zonas quemadas.

Como paso posterior en el trabajo, hemos iniciado un análisis de la relación entre los indicadores de peligro y variables meteorológicas. Utilizaremos la temperatura del aire y la precipitación, que se interpolan con resolución de 1 x 1 km a partir de los datos del I.N.M., y la radiación solar y la temperatura del suelo que obtenemos diariamente mediante datos Meteosat y NOAA.

Agradecimientos. Los autores desean agradecer a la Dirección General de Conservación de la Naturaleza, CICYT y Junta de Castilla y León, la financiación del convenio y los proyectos que han hecho posible este trabajo.

Referencias.

- [1] A. FERNANDEZ, P. ILLERA, J.A. DELGADO & A. CALLE "A system for operational fire monitoring using AVHRR images". Proc. of the Meteorological Satellite Data Users' Conference, Winchester, U.K., 1995, 123-130.
- [2] G. W. PALTRIDGE & J. BARBER "Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA-AVHRR data". Remote Sensing of Environment, 1998, 25, 381-394.
- [3] R.E. BURGAN "Use of remotely sensed data for fire danger estimation". Proc. International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management, Alcalá de Henares, 1995, 87-97.
- [4] R.R. NEMANI & S. RUNNING "Estimation to regional resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data". Journal of Applied Meteorology, 1989, 28, 276-284.
- [5] V. CASELLES, C. COLL, E. RUBIO, F. SOPEDRA y E. VALOR "La medida de la temperatura y de la emisividad desde satélites: estado actual y perspectivas futuras". Teledetección: usos y aplicaciones, ed. Universidad de Valladolid, 1997, 487-492.
- [6] A. FERNANDEZ, P. ILLERA & J.L. CASANOVA "Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data". Remote Sensing of Environment, in press.
- [7] P. ILLERA, A. FERNANDEZ & J.A. DELGADO "Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger". International Journal of Remote Sensing, 1996, 17, 1093-1105.
- [8] R.R. NEMANI, L. PIERCE, S. RUNNING and S. GOWARD "Developing satellite estimates of surface moisture status". Journal of Applied Meteorology, 1993, 32, 548-557.