

ANÁLISIS DE INCENDIOS CON IMÁGENES AVHRR: ESTIMACION DEL PELIGRO, DETECCIÓN Y CARTOGRAFIA

A. Fernández Unzueta, P. Illera Gutiérrez y J. A. Delgado de la Mata

Departamento de Física Aplicada I, E. T. S. de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid. Avda. de Madrid 57, 34071 Palencia, tef: 34-79-729048, fax: 34-79-712099, e-mail: jois@cpd.uva.es

J. L. Casanova Roque y A. Calle Montes

Departamento de Física Aplicada I, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid. Prado de la Magdalena s/n, 47071 Valladolid, tef: 34-83-423130, fax: 34-83-423130, e-mail: jois@cpd.uva.es

RESUMEN.- En este trabajo presentamos un sistema para el control operativo de incendios forestales mediante imágenes NOAA-AVHRR. El sistema trabaja según tres líneas: 1) antes del incendio se estima el peligro debido al estrés hídrico de la vegetación mediante dos procedimientos distintos analizando las evoluciones temporales del NDVI y de la pendiente entre la temperatura del suelo y el NDVI. 2) Durante el incendio, el algoritmo proporciona automáticamente su detección usando umbrales locales en la diferencia de temperaturas de brillo T_3-T_4 . 3) Después del incendio permite la estimación automática del área afectada mediante técnicas de detección de cambios que utilizan la diferencia y la regresión entre los valores del NDVI anteriores y posteriores a la fecha del incendio.

ABSTRACT.- In this work an operational system for fire monitoring has been developed using NOAA-AVHRR images. This system allows us to work along three lines: 1) before the fire, the danger due to vegetation water stress is estimated using two different procedures. Firstly, the NDVI temporal evolution is analyzed. The other indicator is derived from the temporal evolution of the slope between ground temperature and the NDVI. 2) During the fire occurrence, the algorithm provides fire detection, using local thresholds in the difference T_3-T_4 brightness temperatures. 3) The values of the NDVI generated for the days before and after the fire are used to estimate affected areas. The change detection techniques of difference and regression are used. The algorithm automatically generates thresholds by means of the analysis of the values in the area surrounding the forest fire.

1.- INTRODUCCION

Los incendios forestales constituyen uno de los mayores problemas medioambientales que afectan a los bosques mediterráneos españoles, siendo destruidas grandes extensiones cada verano. Según datos oficiales, durante el período 1990-1994 han sido afectadas en España más de un millón de hectáreas, siendo la campaña de 1994 la peor de todas con más de 400.000 ha quemadas y con un importante número de grandes incendios que pueden calificarse como catástrofes ecológicas. La mejora de los sistemas de prevención y extinción de los incendios forestales constituye un objetivo primordial y la Teledetección es una herramienta muy útil para alcanzar este propósito. Los instrumentos a bordo de los satélites NOAA envían imágenes de zonas amplias hasta cuatro

veces al día con una resolución espacial de 1 x 1 km, lo que permite una vigilancia global con una repetitividad muy adecuada y a un coste bajo. Los dos primeros canales del radiómetro AVHRR se pueden combinar para obtener índices de vegetación del tipo NDVI. Así mismo, los tres canales térmicos con que está equipado permiten realizar medidas de la temperatura de superficie. Las imágenes resultan muy útiles para llevar a cabo un seguimiento en tiempo real del estado de la vegetación y su frecuencia permite también abordar estudios de evolución temporal.

Las aplicaciones de estos satélites en la vigilancia de incendios pueden concretarse en tres líneas: antes del incendio permiten la estimación de índices de peligro asociado al estrés hídrico de la vegetación (Paltridge and Barber, 1988; López et al., 1991). Durante el incendio se pueden utilizar para detectar y analizar la evolución de los focos activos (Matson et al, 1984; Flannigan and Vonder Haar, 1986). Finalmente, tras la extinción permiten la cartografía rápida de las zonas afectadas (Kasischke et al., 1993; Kasischke and French, 1995).

En nuestro Departamento hemos desarrollado un sistema de vigilancia de incendios que permite trabajar en estas tres líneas (Illera et al., 1995a; Fernández et al., 1995). A continuación describimos las características del sistema y analizamos sus resultados utilizando imágenes NOAA-AVHRR captadas por el receptor NOAA-HRPT instalado en la Universidad de Valladolid, comparándolos con los datos de los Partes de incendios suministrados por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (I.C.O.N.A.).

2.- DATOS

El estudio se ha llevado a cabo usando imágenes NOAA-AVHRR de la Península Ibérica correspondientes a los meses de abril a octubre de los años 1993 y 1994. Se han utilizado los cinco canales del sensor AVHRR. Las imágenes han sido captadas por el receptor NOAA-HRPT instalado en nuestro Departamento y se han georeferenciado y calibrado para obtener temperaturas de brillo y albedos mediante software propio (Illera et al., 1995b). Las imágenes de NDVI se han combinado para generar Compuestos de Valor Máximo MVC cada diez días. El estudio se ha realizado en las provincias que forman las Comunidades de Aragón, Castilla la Mancha, Cataluña, Valencia, Murcia y Andalucía, cubriendo toda la zona oriental de la Península. Estas zonas, de vegetación típicamente mediterránea, son las más proclives a los grandes incendios forestales, siendo el verano la época de mayor peligro.

Se han utilizado también datos de suelo recogidos por el I.C.O.N.A., consistentes en la fecha en la que se producen los incendios, su situación geográfica en redes de 10 x 10 km y su extensión. Estos datos nos han permitido adaptar los umbrales de detección y cartografía, así como hacer un estudio de la validez de los índices de peligro generados.

La muestra utilizada en 1993 ha consistido en 617 incendios de tamaños entre 0 y 6.000 ha. En 1994 se han empleado únicamente los grandes incendios ocurridos dicho año, utilizándose un total de 32 incendios con tamaños entre 1.000 y 30.000 ha.

3.- ESTIMACION DE INDICES DE PELIGRO

Antes del incendio se pueden calcular índices de peligro debido a la humedad del combustible o estrés hídrico de la vegetación. En el sistema hemos implementado dos procedimientos.

El primero se basa en el análisis de la evolución temporal del NDVI (Paltridge and Barber, 1988; López et al., 1991), cuya disminución se puede relacionar con el estrés hídrico. Como

indicador del peligro se utiliza la suma de pendientes de dicha curva de evolución desde la primavera hasta la época en la que se produce el incendio:

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

Es de esperar que la pendiente presente valores negativos durante los períodos de peligro y suponemos, por lo tanto, que el decremento de esta pendiente acumulada PA supone un aumento del peligro de incendio. Para validar este índice, se han utilizado 617 incendios de todos los tamaños del año 1993 y 25 grandes incendios del año 1994.

En un primer análisis del índice citado, se observa que existe cierta confusión entre sus valores para zonas con distintos usos del suelo. Para evitarla, hemos utilizado los valores de la integral del NDVI calculada durante el mismo período. Al superponer los valores con los datos de los incendios, llegamos a la conclusión de que estos se producen para valores de la integral superiores a la media de la fecha analizada como se puede ver en la Figura 1. Así, proponemos utilizar en un primer paso la integral del NDVI como una máscara que permita delimitar en qué áreas se debe analizar el peligro de incendios. Este resultado puede ser de gran interés en zonas donde no exista una cartografía digital actualizada de la vegetación.

En un segundo paso, se calculan los valores de la PA y se comparan con los datos de tierra. Como resultado encontramos que los incendios pequeños (<1.000 ha) se producen para cualquier valor de la PA, no teniendo en este caso el índice utilidad. En cuanto a los grandes incendios, los resultados indican que un 59% de ellos y un 81% de la superficie afectada tienen lugar para bajos valores de la PA (Figura 2), con lo que parece útil para estimar el peligro de aparición de grandes incendios. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de peligro de incendio calculado mediante el procedimiento descrito.

El segundo indicador se deriva de la relación entre la temperatura del suelo y los valores del NDVI (aproximadamente lineal con pendiente negativa). Diversos autores (Nemani and Running, 1989; Goward and Hope, 1989) han sugerido una relación entre dicha pendiente y la evapotranspiración en bosques. La comparación con datos de tierra nos ha permitido detectar una disminución de este índice antes de la aparición de grandes incendios. Para ello, se analizó una muestra de 23 grandes incendios (>1.000 ha) ocurridos entre abril y julio de 1994. Así mismo, se generaron diariamente valores del NDVI y de la temperatura del suelo y se calcularon las pendientes en áreas de 20 x 20 km siguiendo el procedimiento propuesto por Nemani (Nemani et al., 1993). La evolución temporal de la pendiente nos permitió detectar importantes decrementos antes de producirse los incendios (Figura 4). El índice detectó como peligro un 52% de los incendios analizados y un 76% de la superficie afectada (Tabla I). Más aún, el índice detectó todos los grandes incendios (>5.000 ha) excepto un incendio de 29.782 ha que correspondió a un caso de situación nubosa.

	DECRECE LA PENDIENTE	NO DECRECE LA PENDIENTE	NUBES
Nº DE INCENDIOS	12 (52%)	6 (26%)	5 (22%)
SUPERFICIE QUEMADA (ha)	161.193 (76%)	13.422 (6%)	36.860 (18%)

Tabla I.- Pendiente de la relación entre temperatura del suelo y NDVI como indicador de riesgo de incendios

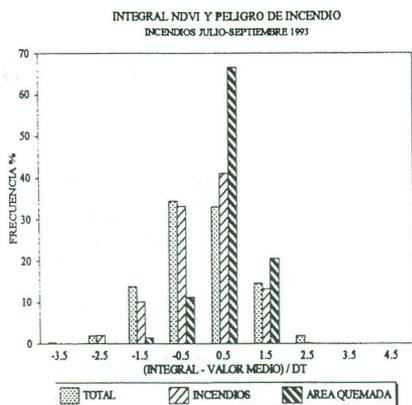


Figura 1.- Integral del NDVI y frecuencia de incendios de julio a septiembre de 1993. Las clases corresponden a valores tipificados de la integral en cada zona y época analizada. El histograma muestra la frecuencia para todos los píxeles analizados, para el número de incendios y para la superficie quemada. El 58% de los incendios y el 87% de la superficie afectada se producen para valores de la integral mayores que la media. La muestra de 25 grandes incendios en el verano de 1994 proporciona unos resultados del 88% de los incendios y del 98% de la superficie afectada por encima de la media.

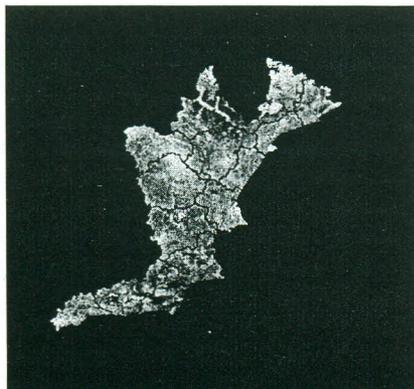


Figura 3.- Imagen de peligro para el periodo del 2 al 11 de julio de 1994. Las áreas en peligro se indican en rojo superpuestas al NDVI-MVC de la misma época. (C. 36)

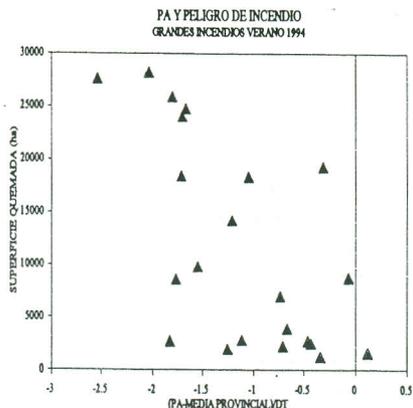


Figura 2.- Valores de la PA para los grandes incendios del verano de 1994. Parece existir una relación entre la PA y el número de incendios y también entre la PA y la superficie quemada. Los grandes incendios ocurren para valores bajos y negativos de la PA pero dependen de la zona y de la época considerada. Para comparar la muestra en conjunto se ha tipificado la PA con respecto a la media y desviación típica de cada provincia y fecha del peligro (período de 10 días del MVC anterior al incendio). El 59% de los incendios y el 81% de la superficie quemada tienen lugar para valores de la PA tipificada menores que -1.

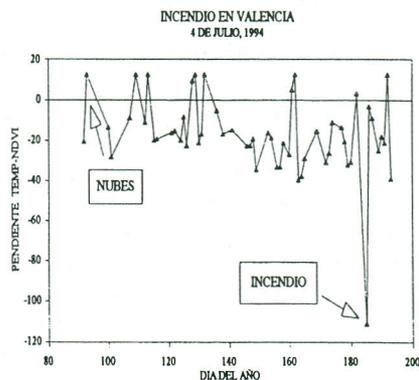


Figura 4.- La pendiente entre la temperatura del suelo y el NDVI decrece fuertemente antes de ocurrir el incendio. Se han codificado las nubes con valores positivos.

4.- DETECCION DE FOCOS ACTIVOS

Para desarrollar esta aplicación se utilizan los albedos α de los canales 1 y 2 (sólo para imágenes diurnas) y las temperaturas de brillo T de los canales 3 y 4 (o 5). De acuerdo con las leyes de la radiación, los focos a temperaturas elevadas emiten en longitudes de onda más cortas, por lo que el canal 3 del AVHRR resulta muy adecuado para la detección de incendios. Los mejores resultados se obtienen utilizando la diferencia de temperaturas de brillo en los canales 3 y 4 (o 5) y el problema consiste en determinar umbrales adecuados para distinguir los focos activos. Nuestro sistema lo resuelve automáticamente mediante el análisis de los histogramas de las imágenes y de las diferencias T_3-T_4 llevado a cabo localmente a lo largo de toda la imagen. En cada caso se calcula el valor medio μ y la desviación típica σ en áreas de 19 x 19 píxeles. Para detectar los incendios se llevan a cabo los siguientes tests:

- 1) Detección de nubes utilizando umbrales en el albedo del canal 1 y en las temperaturas de brillo de los canales 4 o 5.
- 2) $T_3 > \mu_3 + 2\sigma_3$
- 3) $T_3-T_4 > \mu_{3,4} + 2\sigma_{3,4}$
- 4) $\alpha_2 < \mu_2 + \sigma_2$ para evitar problemas de saturación en imágenes diurnas.

De esta forma, partiendo de las imágenes, se obtienen automáticamente los píxeles afectados por incendios, agrupados si corresponden al mismo y localizados geográficamente. Se considera también la posibilidad de hacer un seguimiento de la evolución temporal del incendio de forma que el resultado final se obtenga de la detección llevada a cabo con varias imágenes. Como ejemplo, en la figura 5 se muestran los resultados del algoritmo de detección para 5 incendios producidos en el Levante español en la segunda semana de julio de 1994.

El análisis de los canales térmicos basado en la técnica multiespectral de Dozier (Dozier, 1981) hace también posible una primera estimación de la superficie quemada. Estas técnicas pueden aplicarse así mismo para determinar los umbrales T_3-T_4 en el caso de focos de tamaño inferior a un píxel (Lee and Tag, 1990) y se pueden utilizar en el control de quemas agrícolas y de su proximidad a zonas forestales.

5.- CARTOGRAFIA DE SUPERFICIES AFECTADAS

La diferencia de valores del NDVI antes y después del incendio permite llevar a cabo una cartografía rápida de las superficies afectadas (Malingreau et al., 1985; Kasischke et al, 1993). El procedimiento utilizado es análogo al descrito en el apartado anterior. En este caso es necesario dar como datos de partida las imágenes de NDVI de las fechas anterior y posterior y las coordenadas aproximadas del centro del incendio. A partir de ellos nuestro sistema determina automáticamente los umbrales que permiten detectar las áreas quemadas analizando una ventana de 100 x 100 píxeles alrededor del incendio. Se han probado dos técnicas de detección de cambios.

La primera consiste en analizar las diferencias entre los valores del NDVI anterior, $NDVI_A$, y posterior, $NDVI_P$, al incendio. El píxel se supone quemado cuando:

$$NDVI_A - NDVI_P > \mu_{A-P} + 2\sigma_{A-P}$$

siendo μ_{A-P} y σ_{A-P} la media y la desviación típica de las diferencias en la ventana considerada. En el segundo caso se utiliza la técnica de regresión. Se estima píxel quemado cuando:

$$NDVI_p < NDVI_{PE} - 2S$$

siendo $NDVI_{PE}$ el estimado mediante regresión de la segunda fecha respecto a la primera y S el error de la regresión.

El análisis de una muestra de 44 incendios de tamaños entre 400 y 30.000 ha proporciona los resultados mostrados en la Tabla II. El algoritmo de regresión conduce a mejores estimaciones con sesgo prácticamente nulo y desviaciones entre nuestros resultados y las superficies reflejadas en los Partes del I.C.O.N.A. del 20%, obteniéndose un 75% de los casos con errores individuales menores que el 30%. Esto indica que el procedimiento resulta útil para producir este tipo de cartografía en el caso de incendios extensos, a pesar de las limitaciones en la resolución espacial de los satélites de la serie NOAA.

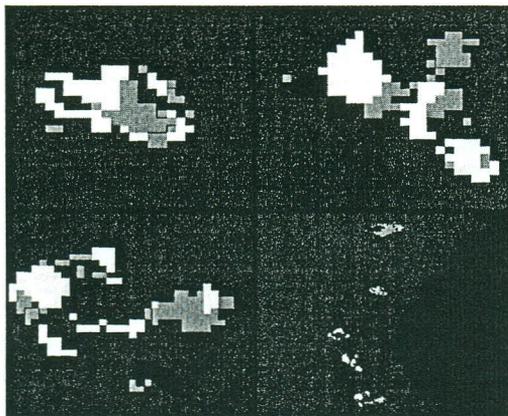


Figura 5.- Aplicación del algoritmo automático de detección a los grandes incendios del Levante de julio de 1994. Se observan cinco incendios simultáneos así como un zoom de tres de ellos. Las áreas activas corresponden a: día 4 a las 17.01 (rojo); día 4 a las 18.52 (amarillo); día 5 a las 05.23 (azul claro); día 6 a las 05.11 (blanco); día 7 a las 19.27 (azul oscuro) y día 8 a las 07.45 (rosa) (C. 37)

	N° DE INCENDIOS	SUPERFICIE TOTAL QUEMADA (ha)		DM %	DCM %	% DE INCENDIOS CON ERROR EN AREA <		
		ICONA	ESTIMADA			10%	20%	30%
DIFERENCIA	44	287.276	296.400	3.2	24	36	57	68
REGRESION	44	287.276	284.800	-0.9	20	43	70	75

Tabla II.- Cartografía de incendios mediante los valores del NDVI anterior y posterior al incendio. Las estimaciones de la superficie afectada se comparan con los datos suministrados por el I.C.O.N.A. Se presentan la superficie total quemada, el error medio y el error cuadrático medio entre las estimaciones de los algoritmos y los datos del suelo en % así como el porcentaje de incendios con error en área menor que el 10, 20 y 30%.

6.- CONCLUSIONES

En el trabajo se describe un sistema de vigilancia de incendios forestales utilizando imágenes NOAA-AVHRR. Permite estimar índices de peligro de aparición de incendios extensos, detectar y estudiar la evolución de focos activos y llevar a cabo una cartografía rápida de las superficies afectadas.

El peligro de incendios es asociado al estrés hídrico de la vegetación y se calcula mediante dos procedimientos. En primer lugar se analiza la evolución temporal del NDVI desde la primavera hasta la época anterior al incendio. Como resultados obtenemos que un 87% de la superficie afectada tiene lugar en zonas con valores de la integral del NDVI superiores a la media de la época considerada, lo que nos permite reducir las áreas en las que se calcula el peligro sin necesidad de disponer de cartografía de superficies forestales. Como indicador de peligro se utiliza la suma de pendientes de la curva de evolución del NDVI que resulta un índice adecuado en un 81% de la superficie afectada por grandes incendios. El segundo índice de peligro surge de la pendiente entre la temperatura del suelo y el NDVI que está relacionada con la evapotranspiración. Como resultado obtenemos que el 76% de la superficie afectada es detectada como de riesgo por este indicador.

La detección de focos activos se basa en el análisis de las imágenes de los canales 3 y 4. Los valores de la temperatura T_3 y de la diferencia T_3-T_4 , analizados localmente a lo largo de toda la imagen, permiten el establecimiento automático de umbrales para delimitar la zona incendiada. El procedimiento detecta así los píxeles activos, georreferenciados y agrupados si pertenecen al mismo incendio. Es posible también hacer una primera estimación del área afectada y detectar focos de tamaño inferior a un píxel.

Finalmente, la comparación de los valores del NDVI en fechas anterior y posterior al incendio permite una estimación del área total quemada. Como técnicas de detección de cambios se han utilizado la diferencia y la regresión con resultados similares aunque algo mejores en el segundo caso en que se obtiene un 20% de error entre las superficies detectadas por el sistema y los datos del suelo. Los umbrales también se determinan automáticamente y sólo es necesario conocer la zona aproximada en la que se produce el incendio.

En conclusión, la comparación con los datos de suelo nos indica que el procedimiento es adecuado para llevar a cabo una vigilancia operativa de incendios forestales con la limitación de la resolución espacial de los satélites NOAA. El diseño del sistema permite su uso por personal no especializado y su implementación en cualquier red de vigilancia de incendios.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen al I.C.O.N.A. el haberles proporcionado los Partes de incendios con los que ha sido posible realizar el presente estudio. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto C.I.C.Y.T. ESP93-0450.

7.- REFERENCIAS

- Dozier, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sens. Environ.* 11: 221-229.
- Fernández, A., Illera, P., Delgado, J. A. and Calle, A. 1995. A system for operational fire monitoring using AVHRR images. En *Proc. The Meteorological Satellite Data Users' Conference (Polar Orbiting Systems)*. EUMETSAT (Ed.). Winchester. U.K. pp 123-130.

- Flannigan, M. D. and Vonder Haar, L. 1986. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Can. J. Forest Res.* **16**: 975-982.
- Goward, S. N. and Hope, A. S. 1989. Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: preliminary FIFE results from AVHRR data. *Ad. Space Res.* **9**: 239-249.
- Illera, P., Fernández, A. and Delgado, J. A. 1995a. Fire monitoring in Spain using NOAA thermal data and NDVI. En *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing*. Jan Askne (Ed.) 377-383. Balkema. Rotterdam.
- Illera, P., Delgado, J. A. and Calle, A. 1995b. A navigation algorithm for satellite images. *Int. J. Remote Sens.* En prensa.
- Kasischke, E. S., French, N. H. F., Harrell, P., Christensen, N. L., Ustin, S. L. and Barry, D. 1993. Monitoring wildfires in boreal forests using large area AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sens. Environ.* **45**: 61-71.
- Kasischke, E. S. and French, H. F. 1995. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR-NDVI composite data. *Remote Sens. Environ.* **51**: 263-275.
- Lee, F. and Tag, P. M. 1990. Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7- μm channel. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **71**: 1722-1730.
- López, S., González, F., Llop, R and Cuevas, J. M. 1991. An evaluation of the utility of NOAA-AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *Int. J. Remote Sens.* **12**: 1841-1851.
- Malingreau, J. P., Stephens, G. and Fellows, L. 1985. Remote sensing of forest fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio.* **14**: 314-321.
- Matson, M., Schneider, S. R., Aldrige, B. and Satchwell, B. 1984. Fire detection using the NOAA series satellites. *NOAA Technical Report NESDIS. 7*. Washington D.C.
- Nemani, R. R. and Running, S. 1989. Estimation of regional resistance to evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR data. *J. Appl. Meteor.* **28**: 276-284.
- Nemani, R. R., Pierce, L., Running, S. and Goward, S. 1993. Developing satellite estimates of surface moisture status. *J. Appl. Meteor.* **32**: 548-557.
- Paltridge, G. W. and Barber, J. 1988. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA-AVHRR data. *Remote Sens. Environ.* **25**: 381-394.