

CARTOGRAFÍA Y EVALUACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN. EL EJEMPLO DE LA HOYA DE BUÑOL, (VALENCIA)

Olga Viedma y Emilio Chuvieco
Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares

60

Resulta CASI SUPERFLUO INSISTIR SOBRE LA IMPORTANCIA MEDIOAMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN NUESTRO PAÍS. COMO UN TEMA RECURRENTE, TODOS LOS VERANOS OCUPA LAS PRIMERAS PÁGINAS EN LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN, LO QUE INDICA LA SENSIBILIDAD PÚBLICA SOBRE ESTE PROBLEMA. CON DATOS DEL ICONA, PUEDEN ESTIMARSE EN UN TOTAL DE 2.410.916 LAS HECTÁREAS QUEMADAS EN NUESTRO PAÍS ENTRE 1980 Y 1989, UNA EXTENSIÓN EQUIVALENTE A LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE VALENCIA, AUNQUE SE TRATE DE SUPERFICIES ACUMULADAS, QUE PUEDEN INCLUIR ÁREAS QUEMADAS MÁS DE UNA VEZ EN ESE PERÍODO. SEGÚN LA MISMA FUENTE, EL VOLUMEN DE PÉRDIDAS ALCANZA LOS 443.450 MILLONES DE PESETAS EN ESE PERÍODO, SIN CONSIDERAR LAS DERIVADAS DE LOS EFECTOS MEDIOAMBIENTALES QUE GENERAN LOS INCENDIOS.

PESE AL GRAN ESFUERZO QUE REALIZAN EL ICONA Y LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS EN ESTE ÁREA, LA MAGNITUD DEL FENÓMENO ACONSEJA DIVERSIFICAR LOS MEDIOS TENDENTES A SU MEJOR CONOCIMIENTO Y PREVENCIÓN. JUNTO A LAS MEDIDAS TÉCNICAS Y POLÍTICAS ADECUADAS, TAMBIÉN RESULTA NECESARIO AUMENTAR LA INVESTIGACIÓN VOLCADA EN ESTOS TEMAS. CON ESTE PROPÓSITO, EL PROGRAMA MEDIOAMBIENTAL DE LA C.E.E. HA INCLUIDO ESTE AÑO UN CAPÍTULO PROPIO SOBRE INVESTIGACIÓN EN INCENDIOS FORESTALES, QUE SE UNE A OTRO YA ACTIVO EN EL PROGRAMA AGRÍCOLA. ASIMISMO, EL ESTUDIO DE INCENDIOS FORESTALES SE RECOGE ENTRE LAS LÍNEAS PRIORITARIAS DEL PROGRAMA MEDIOAMBIENTAL DE LA CICYT.

TELEDETECCIÓN E INCENDIOS FORESTALES

La observación de la Tierra que realizan los satélites de teledetección se ha demostrado muy valiosa para el estudio y prevención de desastres naturales, como sequías, erupciones volcánicas o inundaciones. La estabilidad orbital de estos satélites facilita notablemente el análisis multitemporal, al adquirir las imágenes de modo sistemático y periódico, y en similares condiciones de observación. Para el caso concreto de los incendios forestales, la teledetección permite abordar un estudio de la zona siniestrada, antes y después de ocurrir el fenómeno, con lo que puede seguirse con gran detalle los efectos del problema y la evolución ecológica de la zona afectada. Además, puede utilizarse para estimar las condiciones de peligro, mediante una observación frecuente del estado de la cubierta vegetal. Por último, en combinación con otras variables espaciales, permite generar modelos de riesgo, con objeto de realizar medidas preventivas en aquellas áreas con mayor incidencia de los factores asociados al inicio o al desarrollo del fuego (Chuvieco, 1992).

Estas aplicaciones se basan en las principales ventajas que proporciona la teledetección espacial frente a la aérea:

1. Facilita información panorámica y global de las cubiertas vegetales, difícilmente abordable por otros medios.

2. La naturaleza multiespectral de estos sensores espaciales permite obtener datos de regiones no visibles del espectro, no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, y microondas.

3. La órbita multitemporal de los satélites de teledetección los hace ideales para el seguimiento de fenómenos dinámicos, puesto que adquieren imágenes en intervalos cortos de tiempo (entre 30 minutos para el Meteosat y los 26 días del SPOT) y en similares condiciones de observación, lo que facilita la comparación consistente entre ellas.

OBJETIVOS:

El principal propósito de este trabajo, enmarcado en una línea de investigación más amplia, es comprobar las capacidades del sensor Thematic Mapper (TM), abordo del satélite Landsat 5, para la cartografía y evaluación de daños por incendios forestales. El sensor TM proporciona imágenes digitales sobre siete bandas del espectro (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, medio y térmico), con una resolución en terreno de 30 x 30 m, salvo la banda térmica, que

cuenta con 120 x 120 m². El ciclo de cobertura es de 16 días, lo que le convierte en un sensor idóneo para la cartografía, evaluación y seguimiento de áreas quemadas.

Para el trabajo que aquí se presenta se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la idoneidad de las imágenes TM para delimitar el perímetro quemado.

- Aplicar distintas técnicas de detección de cambios para señalar intensidades de daño en la vegetación quemada.

TELEDETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS

Conviene recordar que cualquier proceso de teledetección se basa en la capacidad de un sensor para recoger la energía electromagnética procedente de los objetos que se observan, ya sea por emisión propia, ya por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial (Chuvieco, 1990). Por lo tanto, un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes elementos (fig. 1): una fuente de energía (i), que es el origen del flujo detectado por el sensor (la más habitual es el Sol); una cubierta terrestre (ii), que recibe esta señal energética y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas; el sistema sensor (iii), que capta este flujo procedente de la superficie terrestre, lo codifica y graba abordo o lo envía directamente al sistema de recepción (iv), encargado de su archivo y comercialización. Finalmente, el intérprete (v) se encargará de obtener información temática de interés, ya sea mediante análisis visual, ya sobre digital. En consecuencia, para abordar la aplicación de esta técnica al estudio de los incendios forestales, se han de revisar las características espectrales asociadas a este fenómeno, tanto en lo que se refiere al comportamiento radiativo de la vegetación, principal combustible de un incendio, como al incendio en sí mismo.

La caracterización espectral de las masas vegetales presenta algunas dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la señal finalmente detectada por el sensor. En primer lugar, se encuentra la propia reflectividad de la hoja, que depende de su estado fenológico, forma, ángulo frente a los rayos solares, y contenido de humedad. Por otra parte, las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, índice de área foliar, etc., también tienen notable influencia sobre su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían los derivados de la situación geográfica de la vegetación: pendiente, orientación, asociación con otras especies y geometría de la plantación.

(1).-Para un análisis más detallado de las características de la srie Landsat puede consultarse cualquier manual de teledetección: Lillesand y Kiefer; Campbell, 1987; Chuvieco, 1990.

61

Fig. 1: Componentes de un Sistema de Teledetección Espacial

A pesar de estas variaciones, se han establecido una serie de modelos teóricos del comportamiento reflectivo de la vegetación (Sellers, 1989), que nos permiten conocer la relación entre las propiedades ópticas de la cubierta vegetal y su estado, facilitando la interpretación de la señal finalmente codificada en la imagen. De acuerdo a estas investigaciones, el comportamiento espectral típico de la vegetación sana (fig. 1), muestra una reducida reflectividad en la región electromagnética del espectro visible (0,4 - 0,7µm), elevándose en el infrarrojo cercano (0,7 - 1,3 µm), para reducirse paulatinamente hacia el infrarrojo medio (Knipling, 1970). Estas características espectrales se deben fundamentalmente a la acción de los pigmentos fotosintéticos, la estructura interna de las hojas y su contenido en humedad.

Cualquier fuente de estrés en la vegetación se traducirá en un comportamiento espectral, más o menos alejado, de lo anteriormente expuesto. Así, la vegetación quemada se caracteriza por un incremento de la reflectividad en el visible, un decremento en el infrarrojo cercano y un ligero aumento en el infrarrojo medio. Las causas de este comportamiento espectral derivan de los siguientes factores (Tanaka et al., 1983; Arbiol et al., 1987; Chuvieco y Congalton, 1988; Samarakoon et al, 1988):

1. La pérdida de pigmentos de las hojas, que son los que absorben fuertemente en el visible, implica un aumento de la reflectividad en esta región del espectro.
2. El deterioro de la estructura celular de la hoja reduce su reflectividad en el infrarrojo cercano.
3. La falta o ausencia de agua aumenta la reflectividad de la vegetación quemada en el infrarrojo medio.

Estas alteraciones reflectivas varían según el distinto grado de destrucción y carbonización, el efecto de las lluvias postincendio y los cambios de iluminación debidos al relieve. Sin embargo, la curva de los bosques quemados tiende a ser más horizontal y aplanada, con el consiguiente problema de confusión con otros tipos de cubiertas (Tanaka et al., 1983). Los principales problemas que se han detectado hasta el momento para cartografiar áreas quemadas a partir

Fig. 3: Desarrollo Espacial del incendio de La Hoya de Buñol (cortesía de D.Rafael Currás)

METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO:

Los objetivos anteriormente indicados se han abordado tomando como ejemplo el incendio ocurrido en el verano de 1991 sobre la Hoya de Buñol (Valencia), uno de los más grandes de la última década. La zona afectada se sitúa, aproximadamente, en el centro geográfico de la provincia de Valencia. El incendio afectó a los municipios de Siete Aguas, Chiva, Buñol, Yátova, Turís, Macastre, Dos Aguas y Cortes de Pallás.

Se trata de una zona secularmente afectada por los incendios forestales, al recoger las características propias de la fachada mediterránea de nuestro país: veranos muy secos, orografía compleja, vegetación pirofítica, un uso intenso y prolongado de la tierra, sujeto a una transformación reciente (abandono de las tierras de cultivo y creciente empleo de las zonas forestales como lugares de esparcimiento o residencia).

El incendio se inició en la tarde del día 28 de julio por la caída de un rayo en el municipio de Yátova, en una zona de ladera con exposición sur, donde la vegetación, compuesta fundamentalmente por matorral y monte bajo arbolado, constituye el combustible ideal para el inicio del incendio (fig. 3). La concurrencia de otros incendios intencionados, así como la propia orografía del terreno, dificultó el primer ataque del fuego. En los días siguientes, los fuertes vientos de poniente complicaron notablemente el empleo de medios aéreos, incrementando, a la vez, el índice de propagación. Por otra parte, al foco inicial se sumaron otros tres, de carácter intencionado, que contribuyeron a extender considerablemente el área quemada. Finalmente, el día 31 de julio se inició otro incendio en el término municipal de Chiva, al norte de la nacional III, que amenazó con el cierre de esta carretera. La mejora de las condiciones meteorológicas y el progreso de las tareas de extinción permitieron controlar el incendio el día 4 de agosto. El área total afectada por el fuego, según los informes de ICONA, fue de 17.857 Ha. De ellas, un 11% corresponden a terrenos de cultivo y no forestales (roquedo, carreteras, caminos, embalses, barrancos, arroyos, etc...). La superficie afectada por el incendio principal, al sur de la Nacional III, fue de 14.036 Has. de las que 1.574 estaban ocupadas por arbolado adulto, 6.005 por arbolado de regeneración y repoblación y 6.457 por matorral. Por su parte, el incendio de Chiva afectó a un total de

Fig. 2: Reflectividad Espectral característica de la vegetación sana

de imágenes de satélite han sido los siguientes:

1. Confusión entre áreas débilmente afectadas y áreas no quemadas (Benson y Briggs, 1978).
2. Dificil separación de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas no vegetales (superficies edificadas), especialmente cuando la vegetación quemada es poco densa (Tanaka et al., 1983; Chuvieco y Congalton, 1988).
3. Errores en la clasificación de áreas quemadas cuando éstas se sitúan en sombra o en la proximidad de zonas acuáticas (Tanaka et al., 1983).
4. Problemas para discriminar intensidades de daño a partir de la radiancia proveniente de la vegetación quemada (Hitchcock y Hoffer, 1974; Minick y Shain, 1981).

3.821 Has. de superficie forestal, de las cuales 1.000 estaban ocupadas por arbolado adulto, 1.045 por arbolado de repoblación y 1.776 por matorral.

Las peculiares formas que presenta el perímetro del incendio son consecuencia de factores territoriales de gran significación en el avance del fuego, principalmente la topografía de la zona, la disposición de la vegetación y la red de carreteras (fig.3).

SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES

Las imágenes adquiridas para la consecución de nuestros objetivos, corresponden a tres miniescenas del sensor TM, obtenidas el 23 de julio y el 24 de agosto de 1991, y el 30 de noviembre de 1992. La elección de la primera se justifica por tratarse de una situación próxima al incendio y ser un buen reflejo de las condiciones previas de la cobertura vegetal. La imagen del 24 de agosto es la primera disponible tras el incendio, ya que la del 8 de agosto (la más inmediata al evento) ofrecía una casi total cobertura de nubes en el área de estudio. La tercera imagen, más de un año después del incendio, nos sirvió para analizar el proceso de regeneración natural.

Para acometer un análisis multitemporal entre imágenes, es necesario garantizar su consistencia radiométrica y geométrica. El proceso de corrección radiométrica consiste en modificar los valores digitales (ND) de la imagen, con objeto de acercarlos a los que tendría presentes en caso de una recepción ideal. De esta forma, puede paliarse las distorsiones provocadas por la atmósfera, así como posibles problemas derivados de un mal funcionamiento del sensor. En nuestro caso, se procedió a aplicar a las tres imágenes un sencillo proceso de corrección atmosférica por el método de los valores mínimos.

En cuanto a la corrección geométrica, supone un cambio en la posición y en las coordenadas de los ND de la imagen, de forma que ésta pueda ajustarse a una cartografía básica. En nuestro caso, el proceso se inició con el registro geométrico de una de las imágenes a la proyección cartográfica del mapa topográfico, escala 1:50.000. Gracias a ello, se obtuvo la imagen corregida a coordenadas UTM. El ajuste conseguido fue apropiado, con un error de 0,8 pixels (unos 25 metros) para 18 puntos de control. Posteriormente, se procedió a la corrección de las imágenes postincendio a partir de la ya corregida, obteniendo un error medio cuadrático menor de 1 pixel.

En la figura 4 aparece la serie de las tres imágenes. Los colores corresponden a una composición en falso color, utilizando las bandas roja, infrarrojo medio y cercano, respectivamente para los colores azul, verde y rojo. En la primera imagen, pueden observarse las condiciones previas al incendio. Los tonos rojos del sector central corresponden a superficie forestal de pino carrasco y matorral esclerófilo. Destaca un pequeño incendio en el sector central (en tonos negruzcos) correspondiente al municipio de Dos Aguas. En la siguiente imagen, adquirida dos semanas después del incendio, se observa con nitidez el área afectada por el mismo, con tonos verdes oscuros, en clara sintonía con el perímetro del incendio que vimos en la figura 3. También se observa la presencia de un banco de nubes en el sector occidental de la imagen, que, como veremos, dificultó la discriminación automática del área quemada. Finalmente, la imagen de noviembre de 1992, un año posterior al incendio, ya permite observar el proceso de regeneración, ofreciendo tonos rojizos, aunque menos densos que en el inicial, para el sector afectado por el fuego.

Fig. 4: Imágenes Landsat-TM correspondientes a la zona de estudio. De izquierda a derecha aparecen la del 23 de julio y 24 de agosto de 1991. En la parte inferior la del 30 de noviembre de 1992.

Fig. 5: Índices de Vegetación (NDVI) generados para las tres imágenes Landsat. El orden corresponde al de la fig. 4.

Fig. 6: Vegetación
intensamente
quemada

Fig. 7 : Vegetación
moderadamente
quemada

Fig. 8: Vegetación levemente
quemada

temporal de estos índices, en las tres imágenes de nuestro estudio.

En la figura 5 aparecen los NDVI correspondientes a las tres fechas. En la primera imagen, correspondiente al NDVI de julio, la vegetación natural sana aparece representada en tonos claros, lo que se traduce en una alta reflectividad y por tanto, en una intensa actividad fotosintética. Sin embargo, el NDVI de agosto, muestra con claridad los efectos del fuego sobre la cubierta vegetal, presentando en tonos muy oscuros todo el área afectada. Por último, el proceso de regeneración se hace evidente en la tercera imagen correspondiente al NDVI de noviembre de 1992, al presentar la vegetación tonos más claros que en agosto de 1991, lo que indica un proceso de recuperación de la vitalidad de la cubierta, aunque sin llegar al estado previo al incendio. Para disminuir el ruido que provocaba la cobertura nubosa del sector oriental de la imagen postincendio, procedimos a generar una máscara que incluyera a estos sectores nubosos, aplicándola posteriormente a nuestros resultados. La delimitación de las nubes se hizo sobre la banda espectral del rojo, puesto que ofrecía el mayor contraste entre las nubes y el suelo desnudo, con valores más altos para las primeras. Bastó, luego, multiplicar cada imagen de los índices de vegetación por esa máscara, para situar en cero aquellos pixels afectados por nubes.

TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

Tras la corrección de las nubes, se establecieron imágenes multitemporales que reflejaran el cambio experimentado por la cubierta vegetal entre las fechas de referencia, con objeto de determinar la extensión del área quemada, así como las intensidades de afectación del fuego sobre la cubierta vegetal. Para ello, comparamos los NDVI generados para las tres fechas, para que nos permitiera evaluar la dinámica vegetal. En este caso, se optó por una simple resta, dos a dos, entre las imágenes del NDVI calculadas para julio, y agosto de 1991 y noviembre de 1992.

A partir de esta combinación aritmética entre las nuevas bandas creadas, se pudo establecer el perímetro del área afectada sobre el primer componente de cambio correspondiente a la diferencia entre las imágenes de julio y agosto; utilizándose los otros dos para el seguimiento de las condiciones de la vegetación tras el fuego.

Para el control de resultados procedimos a realizar un inventario de campo, consistente en un conjunto de parcelas-test distribuidas aleatoriamente en el área de estudio. En ellas se recogía información de

CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN

El contraste radiométrico que, como ya hemos visto, presenta la vegetación sana entre las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro, ha permitido establecer una serie de combinaciones aritméticas entre estas dos bandas, que se denominan índices espectrales de vegetación (IV). Estos índices permiten deducir la intensidad de la actividad fotosintética de la vegetación, pudiendo caracterizar su estado vital. En pocas palabras, se trata de generar una nueva imagen que presente, de forma más nítida, las características de las distintas formaciones vegetales, facilitando su aislamiento de otras cubiertas y la detección de su estado vital (Meliá et al., 1986; Huete, 1987). Los más habituales son el «Cociente Simple», consistente en un ratio simple entre los valores de reflectividad del infrarrojo cercano y del rojo. Y el cociente normalizado, denominado «Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada» (NDVI), definido como el cociente entre la resta de las reflectividades y la suma, para las mismas bandas. Su principal ventaja frente al cociente simple es su más fácil interpretabilidad, ya que está acotado entre ± 1 , con un umbral crítico para las cubiertas vegetales en torno a 0,2. El empleo del NDVI en nuestro trabajo se justifica plenamente si recordamos el notable contraste radiométrico entre la vegetación sana y la quemada. Mientras la primera tenderá a tener valores del NDVI altos (al presentar alta reflectividad en el infrarrojo cercano y baja en el rojo), la quemada ofrece valores del NDVI bajos (al reducirse su reflectividad en el infrarrojo cercano y aumentar en el rojo).

Para valorar cuantitativamente este decremento, y estudiar su aplicación para delimitar el área quemada, se abordó la generación y comparación multi-

las intensidades de daño, así como del proceso de regeneración de las comunidades vegetales afectadas. La elección de las mismas se rigió por su orientación (solana y umbría) y por el tipo de vegetación que presentaban antes del incendio (reconocida por fotointerpretación). De esta forma, se señalaron tres grados de afectación:

- Intensamente quemado: tanto copas como sotobosque totalmente arrasados, (fig. 6).
- Moderadamente quemado: las copas de los árboles parcialmente quemadas y el sotobosque totalmente arrasado, (fig. 7).
- Levemente quemado: Las copas de los árboles apenas afectadas y el sotobosque total o parcialmente quemado, (fig. 8).
- Vegetación sana, no afectada por el fuego.

RESULTADOS:

EVALUACIÓN DEL ÁREA QUEMADA:

La estimación de la superficie afectada por el fuego, como ya se ha comentado, se realizó sobre la imagen de pérdidas del NDVI entre julio y agosto. Se estableció como área quemada todos aquellos sectores de la imagen que contaban con decrementos mayores a 0,2 (recuérdese que el rango del NDVI es entre 1 y -1). Para eliminar el factor distorsionante de las nubes, se multiplicó esta imagen de decrementos por la máscara anteriormente generada, reduciendo a 0 las zonas cubiertas por nubes. Asimismo, se procedió a aplicar un filtro de suavización, con objeto de reducir el efecto frontera. En la fig. 9, aparece el resultado de aplicar este proceso.

Por otra parte, para llevar a cabo el proceso de verificación, la imagen correspondiente al área quemada se superpuso sobre el polígono delimitado por la Unidad Forestal de Valencia sobre el terreno (fig. 10). Como puede observarse, la coincidencia espacial entre ambas fuentes es bastante elevada, del 74,07 %. Estimándose un 11,57 %, como área quemada sólo en la imagen de decrementos y un 14,36 % sólo en el perímetro de la Unidad Forestal.

Conviene considerar que este inventario puede completarse con una evaluación de las especies quemadas, mediante la comparación entre las imágenes anterior y posterior al fuego, como ya han realizado diversos estudios (Chuvienco y Congalton, 1989; Jakubauskas et al., 1990). Esta fase del proyecto será abordado, en nuestro caso, en los próximos meses.

INTENSIDADES DE DAÑO:

A partir de las parcelas test señaladas en el terreno, se calcularon los valores medios del NDVI para cada intensidad de daño, teniendo en cuenta todos los pixels incluidos en cada una de las parcelas.

Como puede observarse en la tabla 1, aparece una gran coincidencia espectral entre los valores de NDVI para la primera y segunda categoría de daño, con valores muy similares tanto en la imagen de agosto, como en la de noviembre. Ante esta situación, se aplicó sobre las muestras una medida de significación estadística, el test de la t de Student, para evaluar la diferencia entre medias. Los resultados fueron satisfactorios, al ofrecer, en todos los casos, niveles de significación superiores al 99%.

Por otra parte, como cabía esperar, los sectores que se habían señalado como intensamente quemados ofrecieron los valores más bajos en la imagen de cambios entre el NDVI de agosto y el de julio (tabla 2). Disminuyendo los decrementos a medida que el nivel de afectación era menor. Asimismo, se puede observar el proceso de regeneración en los valores arroja-

Fig. 9: Delimitación del área quemada a partir de la imagen correspondiente a la diferencia entre los NDVI de julio y agosto.

Fig. 10: Superposición del área quemada estimada por las imágenes Landsat y por técnicas convencionales. En marrón (5 y 6) aparecen las zonas en donde la imagen coincide con el perímetro delimitado por la Unidad Forestal; en amarillo, las sólo estimadas por el perímetro y en rojo, las delimitadas solamente por la imagen.

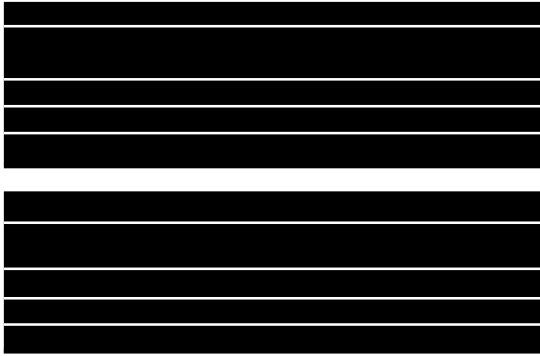


Fig. 11: Valores medios de NDVI para distintas intensidades de daño en la vegetación quemada.

dos por las diferencias entre NDVI de noviembre - julio y de noviembre - agosto; pasando de un valor de -0,442 a +0,215.

En la figura 11 se puede observar la evolución general del estado vital de la vegetación entre las fechas de referencia. Así, en julio, antes del incendio, todas las zonas en las que se establecieron parcelas-test, presentaban valores de NDVI normales en función del estado fenológico en el que se encontraba la cubierta vegetal. Sin embargo, el índice de vegetación de agosto muestra claramente los efectos del fuego sobre la cubierta vegetal, al reducirse drásticamente y de forma estratificada, en función de la intensidad del daño que sufren las distintas zonas analizadas. Por último, los NDVI de noviembre del año siguiente presenta el proceso de regeneración de la cubierta vegetal, que resulta más alto en los sectores con menor intensidad de daño, como ya se observó en otros estudios (López y Caselles, 1991).

CONCLUSIONES:

Como se ha visto en este ejemplo, las imágenes captadas por los satélites de observación de la tierra, aportan una valiosa información para la delimitación y evaluación del área quemada. Sin embargo, la elección de uno u otro sensor abordo de dichos satélites nos permitirá obtener y conseguir distintos objetivos. Así, con el uso del sensor Landsat Thematic Mapper, el que ha sido objeto de nuestro estudio, se puede delimitar con nitidez las áreas afectadas por el fuego, así como señalar intensidades de daño en la vegetación; ya que tiene una gran resolución espacial. Es decir, permite captar y recoger información espectral de espacios y objetos de tamaño superior o igual a los 30 m. Sin embargo, si se utilizan otros sensores de mayor resolución temporal, como es el caso del NOAA-AVHRR, se puede hacer un seguimiento del estado hídrico de la cubierta vegetal, utilizando imágenes diarias, y así, estimar, el riesgo de inicio de incendios de acuerdo a la inflamabilidad de la vegetación. En ambos casos, los resultados pueden obtenerse en

tiempo real, facilitando las tareas de prevención y, en su caso, de restauración hidrológico-forestal de los sectores afectados.

Por otro lado, la teledetección integrada con los Sistemas de Información Geográfica (Bases de Datos Georeferenciadas), permite modelizar todas las variables que inciden en el origen y propagación del fuego (topografía, condiciones climáticas, combustible vegetal, actividades humanas y caminos, etc..) pudiendo determinar las superficies boscosas y de monte que más riesgo presentan para la aparición de incendios forestales.

Ante todo lo dicho, se deduce que la teledetección es una herramienta muy valiosa de cara a la planificación y ordenación de los montes afectados por el fuego, así como para aquellas instituciones gubernamentales encargadas de la gestión y administración de los espacios forestales del país, ya que a través de ella se pueden generar de forma rápida y con pocos gastos logísticos, inventarios forestales, cartografía de los combustibles vegetales y parametrización de variables fisiológicas tales como la biomasa, la superficie foliar, la actividad fotosintética, etc.

REFERENCIAS:

- Arbiol, R., Romeu, J. y Viñas, O. (1987): Detecció i evaluació de les superfícies forestals cremades durant l'any 1984 a Catalunya, mitjançant tècniques de teledetecció, *Revista Catalana de Geografia*, vol. 2, pp. 21-46.
- Benson, M.L. y Briggs, I. (1978): Mapping the extent and intensity of major forest fires in Australia using digital analysis of Landsat imagery, en *Proc. Inter. Symp. Rem.Sen. Observ. Inv. of Earth Resources*, Freiburg, pp. 1965-1980.
- Chuvieco, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Rialp, Madrid.
- Chuvieco, E. (1992): Remote Sensing Applications in Forest Fires, en *E.E.C. Course on Forest Fires and Management*, Commission of the European Communities, Bruselas, en prensa.
- Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1988): Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data, *Geocarto International*, vol. 3, pp. 41-53.
- Hitchcock, H.C. y Hoffer, R.M. (1974): *Mapping a Recent Forest Fire with ERTS-1 MSS Data*, LARS Information Note 032674, West Lafayette.
- Huete, A.R. (1987): Spectral signatures and vegetation indices, en *II Reunión Nac. del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Valencia, pp. 13-26.
- 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*, vol. 56, pp. 371-377.
- Knipling, E.B. (1970): Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 1, pp. 155-159.
- López, M.J. y Caselles, V. (1991): Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data, *Geocarto International*, vol. 6, pp. 31-37.
- Meliá, J., Gandía, S. y Caselles, V. (1986): Teledetección y firmas espectrales, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 80, pp. 177-185.
- 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.
- Samarakoon, L.; Kishihara, N.; Shimamura, E. and Ogawa, S. (1988): Fire-damage mapping by Landsat data and an analysis of the factors affecting forest-fire, *Journal of the Japanese Forestry Service*, vol. 70, pp. 403-406.
- Sellers, P.J. (1989): Vegetation- Canopy Spectral reflectance and Biophysical processes, en *Theory and applications of Optical Remote Sensing*, (G. Asrar, Ed.), Wiley, New York, pp. 297-335.
- Tanaka, S., Kimura, H. y Suga, Y. (1983): Preparation of a 1:25.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 4, pp. 17-31.