

ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL EN LOS MUNICIPIOS DE PINÓS Y TORÁ TRAS EL INCENDIO DE 1998 MEDIANTE EL TRATAMIENTO MULTITEMPORAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT ETM+

J. Castillo Negro y J. A. Martínez-Casasnovas

Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. Avda. Rovira Roure 177. 25198-LLEIDA (España). Correo electrónico: j.martinez@macs.udl.es

Resumen

En el presente estudio se determina cuál ha sido la evolución en la recuperación de la cubierta vegetal 3 años después de producirse un incendio, mediante el uso de técnicas de teledetección. El área de estudio se enmarca en la provincia de Lleida y corresponde a parte de la superficie afectada por el incendio que se produjo durante el verano del año 1998. Como punto de partida se establecen comparaciones entre imágenes diferencia para diversos índices de vegetación con el propósito de determinar cuáles de dichos índices se adecuan mejor al estudio de la evolución y recuperación de la cubierta vegetal, observándose mejores resultados para los índices TTVI, AVI, SAVI y DVI. Seguidamente se obtienen las clasificaciones supervisada y no supervisada para la superficie afectada y se comparan entre sí determinando que la supervisada permite establecer una valoración más exacta de la evolución de esa cubierta vegetal, obteniéndose una fiabilidad global superior al 90%. Por otro lado, se analizan las relaciones espaciales existentes entre la vegetación, la regeneración establecida y diversos factores topográficos y, por último, se determinan los cambios de usos del territorio que se han producido como consecuencia del paso del fuego.

Palabras clave: *Teledetección, Índices de vegetación, Clasificación supervisada*

INTRODUCCIÓN

Desde los años sesenta se usan imágenes de satélite para la observación de grandes extensiones. De las posibles aplicaciones las más destacables en el área de los incendios forestales son la asignación de los efectos del fuego, el desarrollo de métodos para una evaluación rápida de superficies afectadas, el estudio de la dinámica de vegetación tras un incendio y la evaluación de la vulnerabilidad y resistencia al fuego de las masas (CHUVIECO, 1999).

La prevención, control y extinción de incendios que se declaran en las masas forestales es un tema de gran importancia en el entorno mediterráneo y de gran preocupación para las administraciones competentes. Durante los días 18 y 21 de julio de 1998 un incendio de grandes dimensiones asoló parte importante de la zona central de Cataluña (más de 27000 hectáreas se vieron calcinadas) (GONZÁLEZ Y CASTELLNOU, 1998). Parte de ese territorio corresponde a la zona de estudio del presente trabajo, un área de 15500 hectáreas localizada básicamente en los

municipios de Torá y Pinós. Vista la importancia de las cifras del incendio resulta necesario desarrollar nuevas técnicas que permitan obtener información de gran utilidad para la gestión de zonas forestales quemadas (MASIP, 2001).

El objetivo del presente trabajo es analizar la respuesta en la recuperación de la cubierta vegetal tras el incendio del Solsonés (Lleida) de 1998 mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca superficies de las provincias de Lleida y Barcelona. En cuanto a la geología y la litología los terrenos que afloran pertenecen principalmente al Oligoceno, siendo los materiales más abundantes las margas y limolitas. Las principales características edáficas son la escasa profundidad, la frecuente pedregosidad y la naturaleza calcárea de los suelos. En general el clima es de tendencia continental, con inviernos relativamente fríos y veranos calurosos con una marcada sequía estival.

La vegetación predominante es básicamente calcícola y xerófita. Como especies principales cabe destacar el pino negro (*Pinus nigra*) y el pino carrasco (*Pinus halepensis*) y un estrato arbustivo de quejigo (*Quercus faginea*) y pies de encina (*Quercus ilex*). Nos hallamos en las fases de degradación correspondientes a los pinares de pino carrasco y negro con un óptimo dominado por el quejigo o la encina según la zona.

METODOLOGÍA

Se han utilizado dos imágenes del satélite LANDSAT 7 ETM+ de Septiembre de 1999 y 2001. Inicialmente se escoge una subescena de trabajo de 45.000 hectáreas dentro de la cual se delimita mediante la aplicación de una máscara la superficie quemada (al final 15.257 hectáreas). Las correcciones radiométricas se basan en la corrección atmosférica mediante el Método del Histograma Mínimo (CAMPBELL, 1987). Para las correcciones geométricas se seleccionan 52 puntos de control y los errores medios cuadráticos no superan el máximo de 25 (21,2 para la

imagen de 1999 y 19,5 para la de 2001). El remuestreo de los números digitales a su nueva posición corregida se realiza con el método del vecino más próximo.

El análisis de los índices de vegetación post-incendio se ha realizado en base al cálculo de los índices que ofrece el módulo de análisis VEGINDEX de IDRISI 32. Estos se clasifican en dos grupos. Por un lado, los basados en la pendiente que se obtienen a partir de combinaciones aritméticas simples basadas en el contraste entre los patrones de respuesta espectral de porciones del espectro electromagnético del rojo y del infrarrojo próximo, y, por otro lado, los basados en la distancia, con los que se obtiene el grado de vegetación de cada píxel mediante la comparación de la diferencia de su valor respecto a la respuesta de suelo desnudo, para lo cual es necesario el cálculo de la línea de suelo (EASTMAN, 2002).

Así, los índices evaluados en el presente trabajo han sido los siguientes. Para el primer grupo de índices: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y las variaciones NDVI₅ y NDVI₇, TVI (Transformed Vegetation Index), CTVI (Corrected Transformed Vegetation Index), TTVI (Thiam's Transformed Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index) y NRVI (Normalized Ratio Vegetation Index). Para el segundo grupo de índices se han empleado: PVI (Perpendicular Vegetation Index), y sus variaciones PVI₁, PVI₂ y PVI₃, DVI (Difference Vegetation Index), AVI (Ashburn Vegetation Index), SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), TSAVI₁ y TSAVI₂ (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index), MSAVI₁ (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) y su variación MSAVI₂ y WdVI (Weighted Difference Vegetation Index).

Una vez obtenidos dichos índices para cada imagen se procede a la resta de los índices dos a dos, llevándose a cabo tres tipos distintos de resta. Estas restas permiten discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras que las que hayan experimentado cambios significativos estadísticamente ofrecerán los valores más alejados de cero (positivos o negativos). La imagen de cambios resultante presentará tonos oscuros para las zonas que

hayan reducido su número digital, los más claros para aquellas que hayan ganado y los intermedios para las zonas estables (CHUVIECO, 1996). Los histogramas obtenidos para las imágenes correspondientes a estas restas reproducen una distribución en la que puede resultar difícil establecer unos cortes claros para poder diferenciar lo que es zona de cambio real de lo que sólo representa una variación aleatoria. En la medida en que el histograma se asemeje a una distribución normal, la desviación estándar medirá la dispersión característica de los valores lejanos a la media y puede ser usada para evaluar la probabilidad de que se produzca realmente esa diferencia. Notando como media al símbolo c y como desviación estándar al símbolo s , se pueden establecer los niveles de confianza que se listan en la tabla 1.

Con los valores obtenidos a partir de las anteriores operaciones se realizan reclasificaciones de la imagen diferencia en tres clases (diferencia significativamente positiva, negativa y cambio aleatorio) a niveles de confianza del 99%, 95 y 90%. Para poder validar estadísticamente los resultados se obtienen en campo una serie de áreas de áreas de entrenamiento, que se reclasifican a los tres niveles de confianza y se cruzan mediante tabulación cruzada con las imágenes diferencia para obtener los Índices de acuerdo KAPPA.

Con la imagen de 2001 se obtiene una clasificación supervisada. Se han definido 10 clases atendiendo al grado de afección del incendio y a las especies presentes en cada clase (tanto la especie que destaca como principal como la que destaca en forma de regenerado). Así, las 3 primeras clases corresponden a superficies definidas como no forestales: matorral, cultivo y suelo desnudo. La cuarta clase corresponde a masas afectada de *Quercus faginea*, con arbustos de quejigo (y encina en menor proporción) de hasta 4 m de altura y regenerado de ambas especies formando una capa densa. La quinta clase

corresponde a masas no afectadas de *Pinus nigra* con densidades de 1200-1500 pies/ha. Las clases sexta y séptima se definen como masas afectadas mixtas ya que en ellas destaca una especie como masa principal (para la sexta *Pinus nigra* y para la séptima *Pinus halepensis*) con densidades de 1000-1200 pies/ha y otra como regenerado (*Quercus faginea* en ambos casos). La octava clase se define como masa afectada de *Pinus halepensis* con densidades de 1000-1500 pies/ha. Las dos últimas clases se definen como clases totalmente afectadas (los árboles están quemados en más del 75% de su porte). Se diferencian en el grado de regeneración, así en las masas quemadas y no regeneradas el regenerado es casi inexistente (existiendo fracciones de cabida cubierta (Fcc) inferiores al 10%) y para las masas quemadas y regeneradas se superan valores de fcc del 10%. También se ha obtenido la clasificación no supervisada partiendo como base de las clases de vegetación definidas en la supervisada.

Para realizar un análisis de relaciones espaciales se ha reclasificado el mapa de clases de vegetación en clases de regeneración. A partir de un Modelo Digital del Terreno (proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional con resolución espacial de 25 m) se han obtenido los mapas de pendientes, orientaciones y exposiciones. También se ha utilizado una clasificación supervisada en base a grados de afección realizada con la imagen de 1999 en un estudio anterior (MASIP, 2001). Entre todos estos mapas se han establecido tabulaciones cruzadas. En la evaluación estadística de dichos cruces, se aplica la prueba Chi Cuadrado de Independencia y diversas medidas de asociación.

Por último, se solapan las clasificaciones supervisadas de 1999 y 2001 para determinar los cambios en los usos del territorio. El mapa obtenido se reclasifica eliminando aquellas clases que representan cambios imposibles y así se obtiene un mapa de dinámica-estabilidad.

	NC 90%	NC 95%	NC 99%
Clase 1	$X < \chi - \sigma$	$X < \chi - 3\sigma$	$X < \chi - 2\sigma$
Clase 0	$\chi - \sigma < X < \chi + \sigma$	$\chi - 3\sigma < X < \chi + 3\sigma$	$\chi - 2\sigma < X < \chi + 2\sigma$
Clase 2	$X > \chi + \sigma$	$X > \chi + 3\sigma$	$X > \chi + 2\sigma$

Tabla 1. Determinación de cada una de las clases de significación o niveles de confianza

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los tipos de resta establecidos y sus reclasificaciones en los tres niveles de confianza destacan los resultados para la resta estandarizada (tabla 2). Para el nivel de confianza del 90% destacan TTVI, AVI, SAVI, PVI₁, PVI₃ y NDVI₅ con Índices KAPPA del 25%. Para DVI y TSAVI₁ se supera el 30%. Las fiabilidades globales son del 50%.

Los mejores resultados se obtienen para los índices TTVI, AVI, SAVI y DVI. Los índices de mayor aplicabilidad a la zona de estudio por su tendencia climática a la mediterraneidad son AVI y sus derivados. Sobre todo SAVI que al incluir el factor de ajuste del efecto del suelo L disminuye el efecto provocado por el suelo desnudo. AVI da mayor importancia en la ponderación a la banda del infrarrojo que SAVI y puede que por ello se esté sobreestimando la respuesta de la vegetación sana. Del segundo grupo de índices TTVI es el que ofrece mejores resultados, ya que en su formulación se eliminan los

valores negativos y se reducen los efectos de ruido provocados por el parámetro verdor.

Ninguna de las clases de vegetación obtenidas mediante la clasificación supervisada representa más del 20% de la superficie total analizada. La clase más destacada es la masa mixta de *Pinus nigra* con regenerado de *Quercus faginea* con un 19%, le siguen las masas quemadas y regeneradas y las masas afectadas de *Pinus halepensis* con regenerado de *Quercus faginea*. Las fiabilidades de usuario y productor son superiores al 85% para todas las clases, la fiabilidad global supera el 90% y el Índice de Acuerdo KAPPA es de 0.77. En la clasificación no supervisada se llegó a la definición final de 6 clases partiendo de las 10 definidas en la supervisada. La validación estadística para la no supervisada establece como Índice de Acuerdo KAPPA el valor de 0.73 con una fiabilidad global del 0.78.

En cuanto a los resultados en la determinación de las relaciones espaciales la prueba Chi Cuadrado de Independencia ha resultado ser negativa, por lo tanto, se pueden establecer com-

INDICE	FIABILIDADES GLOBALES			ÍNDICES DE ACUERDO KAPPA		
	NC 99%	NC 95%	NC 90%	NC 99%	NC 95%	NC 90%
NDVI	39,3	41,0	46,2	7,8	10,3	18,8
RVI	34,5	36,6	37,7	0,0	3,1	5,5
NRVI	34,4	36,3	38,2	1,2	2,6	6,1
TVI	39,2	42,5	50,1	7,7	12,4	23,9
CTVI	39,6	42,2	47,5	8,3	12,1	20,9
TTVI	41,2	45,0	51,5	10,5	16,8	26,4
AVI	42,5	45,5	52,9	12,8	17,9	28,7
SAVI	42,3	45,4	54,1	12,5	17,1	29,9
MSAVI ₁	35,9	37,8	39,5	3,0	6,0	8,4
MSAVI ₂	35,9	38,8	40,5	2,5	7,1	9,9
PVI	34,5	36,9	35,1	0,0	3,6	0,4
PVI ₁	42,0	44,1	54,6	11,9	15,2	26,8
PVI ₂	41,1	42,3	49,4	10,1	12,5	23,4
PVI ₃	34,5	35,1	52,7	0,0	1,0	27,9
DVI	39,2	46,6	54,6	7,4	19,2	30,7
TSAVI ₁	37,0	44,8	55,2	3,9	15,9	32
TSAVI ₂	34,5	39,6	49,6	0,0	7,6	23,4
WDVI	34,6	39,4	49,7	0,2	7,9	23,5
NDVI ₅	42,9	47,6	51,0	12,9	20,2	25,2
NDVI ₇	39,9	41,3	49,0	8,5	10,1	22,0

Tabla 2. Valores del Índice KAPPA y fiabilidades globales (Pc) para la resta estandarizada

paraciones entre las variables enfrentadas para todos los cruces al nivel de confianza del 99%. Las medidas de asociación proporcionan coeficientes de Contingencia y Kramer superiores al 35% para cruces a partir del mapa de vegetación y de 15% a partir del de regeneración. A modo de resultados más interesantes se puede establecer: para exposiciones de solana destaca la existencia de las masas arbóreas mixtas, sobre todo las afectadas de *Pinus nigra* con regenerado de *Quercus faginea* y masas afectadas de *Pinus halepensis* con regenerado de *Quercus faginea* y cultivos. En las umbrías destacan las masas quemadas y en vías de regeneración y las masas afectadas de *Pinus halepensis*. En las pendientes bajas predominan los cultivos, en las medias las masas mixtas sobretodo las de *Pinus nigra*, mientras que en pendientes medias predominan las masas mixtas de *Pinus halepensis*.

Mediante el cruce entre clasificaciones de 1999 y 2001 obtenemos un mapa con 40 clases que se reclasifica a 21 obteniendo el mapa de cambios. A partir de este y puesto que con 21 clases distintas no nos podemos hacer una idea general de la evolución de la cubierta, se ha realizado una reclasificación y se ha obtenido el mapa de dinámica-estabilidad. Así podemos comprobar como la superficie regenerada corresponde a 6.681 hectáreas de las 15.257 afectadas.

CONCLUSIONES

Para los índices de vegetación se evidencia la necesidad de realizar un trabajo de campo más detallado, usando fotografías aéreas para discriminar zonas más extensas y realizándolo en fechas próximas a la toma de la imagen de 1999. Así se tendría una mejor definición de los grados de regeneración un año después de producirse el incendio. Se obtienen mejores resultados mediante la resta estandarizada. La dispersión entre valores es menor, la elección de los límites establecidos para determinar las zonas de diferencia significativa queda más marcada y se incrementa el número de píxeles que caen en las colas de la distribución normal. Los mejores índices en aplicabilidad a la zona de estudio son TTVI, AVI, SAVI y DVI.

En cuanto a las *clasificaciones* se observan mejores resultados mediante la supervisada puesto que se emplean 6 bandas y las clases definidas en un principio se mantienen hasta el final (lo cual evita errores en la definición de clases intermedias). Se establecen como causas principales de las diferencias entre clases la escala de trabajo y el desfase temporal entre el trabajo de campo y la obtención de las imágenes.

Respecto a las *relaciones espaciales*, se obtienen mejores resultados para los cruces entre el mapa de vegetación y los derivados a partir del MDT de pendientes y orientaciones. La distribución de las clases se basa en cultivos en exposiciones de solana y pendientes bajas, las masas de quejigo en solana y pendientes medias-altas, las de pino negro en pendientes medias y umbrías y las de pino carrasco en umbrías.

Se comprueba el establecimiento de la regeneración en más del 40% de la superficie. Mediante una correcta gestión forestal que controle la elevada capacidad regenerativa de las especies germinadoras (quejigo y encina) frente a las de los pinos presentes (carrasco y negro), se puede guiar la evolución de la vegetación actual hacia la potencial.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMPBELL, J.B.; 1987. *Introduction to remote sensing*. The Guilford Press. New York.
- CHUVIECO, E.; 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. 3ª ed. rev. Ediciones Rialp. Madrid.
- CHUVIECO, E.; 1999. *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin*. Ed. Springer. Berlin.
- EASTMAN, J.R.; 2002. *IDRISI 32 version 132.22 On-line help*. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.
- GONZÁLEZ J.M. Y CASTELLNOU, M.; 1998. El fuego en la Catalunya Central. *Montes* 53: 17-20.
- MASIP, G.; 2001. *Análisis de diferentes métodos de clasificación de una imagen de satélite para caracterizar la superficie afectada por el incendio del Solsonés de 1998*. Teledetección. Medio Ambiente y cambio global. Universitat de Lleida. Lleida.

ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL EN LOS MUNICIPIOS DE PINÓS Y TORÁ TRAS EL INCENDIO DE 1998 MEDIANTE EL TRATAMIENTO MULTITEMPORAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT ETM+

J. Castillo Negro y J. A. Martínez-Casasnovas

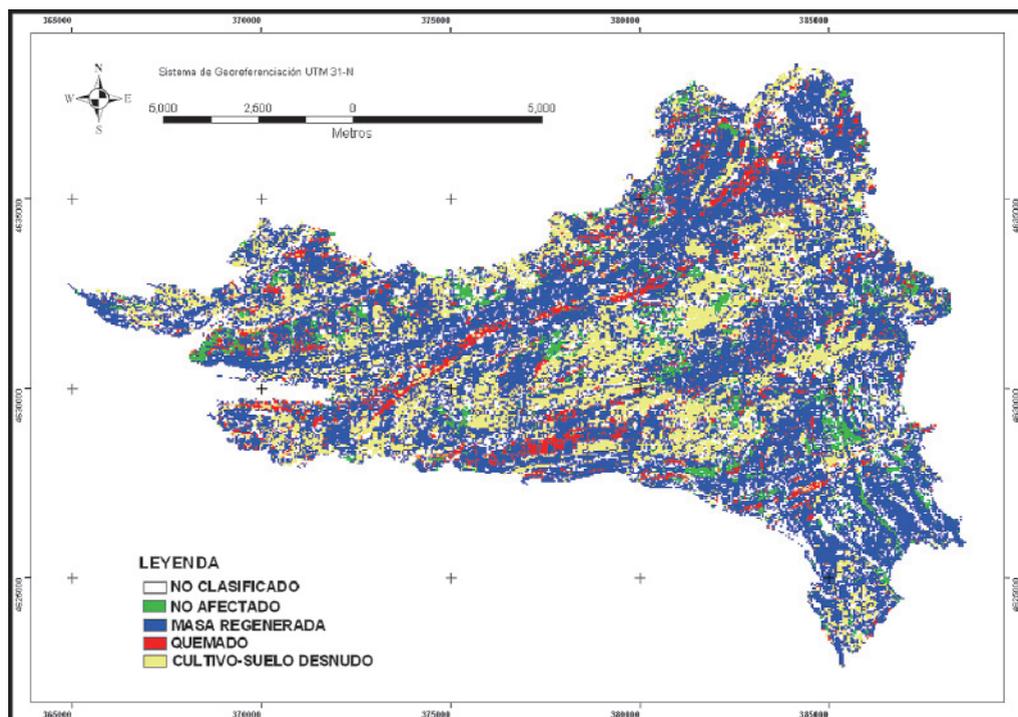


Figura 1. Mapa de dinámica-estabilidad