

## APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN A LA RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS FORESTALES MEDITERRÁNEOS AFECTADOS POR GRANDES INCENDIOS

P. BLANCO y R. M. NAVARRO

ir2blaoy@uco.es

ETSI de Montes-Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Forestal  
Apartado de Correos 3048. 14080 Córdoba

**RESUMEN:** En esta comunicación presentamos una propuesta de restauración forestal del área incendiada en el año 1991 del P. N. "Sierra de las Nieves" (Málaga) elaborada a partir de imágenes Landsat 5 TM, SPOT-P y de un MDE. Mediante técnicas de Clasificación Supervisada se generaron cartografías de vegetación y litología con fiabilidades globales del 84.65% y del 89.69% en cada caso. Su análisis junto a la información topográfica aportada por el MDE permitió la caracterización ecológica de las estaciones forestales presentes en la zona de trabajo y definir las unidades de restauración con un grado de acuerdo del 72.4% respecto a la propuesta de restauración elaborada mediante metodología tradicional.

**ABSTRACT:** This paper presents a proposal of forest ecosystem restoration of the Natural Park "Sierra de las Nieves" (Malaga) burnt area elaborated from Landsat 5 TM, SPOT-P images and DTM information. By means of Supervised Classification techniques maps of vegetation and lithological units were generated with global accuracies of 84.65% and 89.69%. Their analysis in a GIS with topographical information allowed forest site and restoration stands survey with a level of agreement of 72.4% regarding with that proposed by means of traditional methods.

**Palabras Clave:** Landsat, SPOT, estaciones forestales, vegetación, litología, repoblaciones.

### INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son uno de los problemas ecológicos más serios del entorno mediterráneo pese a ser un factor más en la dinámica natural de estos ecosistemas (Naveh, 1975). La respuesta a los problemas ecológicos y socioeconómicos que originan se plantea con la elaboración de planes específicos para la restauración de ecosistemas forestales. Basados en un conocimiento exhaustivo del medio, suponen la zonificación de la zona afectada en *estaciones forestales*, unidades de terreno con una combinación de factores biofísicos diferente de áreas adyacentes, lo que les confiere una potencialidad determinada para la actividad forestal (Pemán y Navarro, 1998), permitiendo establecer los *rodales de restauración*, unidades de ejecución de los trabajos de restauración forestal.

Los métodos tradicionales tienen en común una serie de limitaciones que disminuyen su capacidad de aplicación: i) exigen un trabajo de campo intenso y de carácter multidisciplinario; y ii) resultan difíciles de aplicar en grandes áreas forestales.

Aunque muchas de las propuestas desarrolladas en los últimos años contemplan la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramientas de trabajo, ninguna recoge la posibilidad de utilizar imágenes de satélite para el análisis espacial de factores determinantes de la estación forestal (*tipo de cubierta del suelo, unidades de vegetación, cobertura arbórea, litología*), cuya utilidad se ha puesto de manifiesto en numerosos trabajos (Franklin *et alii.*, 2000).

En el caso concreto de la cartografía de estaciones forestales asistida por teledetección espacial encontramos las experiencias dirigidas por Pu (1991 y 1992), en las que se concluye que imágenes con una adecuada resolución espacial pueden permitir obtener información específica sobre factores medioambientales con suficiente fiabilidad, permitiendo un ahorro en torno al 75% en tiempo y dinero respecto a los métodos tradicionales.

Estos antecedentes establecen las bases de este trabajo. Una cartografía de estaciones forestales utilizando la teledetección como fuente de información alternativa para lograr una útil aproximación a la realidad ecológica

de la zona de trabajo que contribuya a agilizar la planificación previa de los trabajos de restauración. Los objetivos específicos perseguidos son: i) analizar la capacidad de las imágenes Landsat 5 TM y SPOT-P para extraer información sobre factores determinantes de la estación forestal: unidades de vegetación, cobertura vegetal y unidades litológicas presentes, y ii) estudiar la calidad de esta información para el levantamiento de una cartografía de estaciones forestales y de rodales de restauración para la zona de trabajo con el apoyo de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de trabajo

El área de estudio se encuentra dentro de los límites del Parque Natural de la Sierra de las Nieves (Málaga), 2600 Ha. incendiadas en el año 1991 que constituyen un área de gran valor ecológico y protector, por la singularidad de los ecosistemas forestales presentes y por su papel regulador en los procesos erosivos que afectan a una parte importante de la Costa del Sol.

### Fuentes de información utilizadas

Como fuente de información espectral hemos utilizado una imagen Landsat 5 TM del 17 de Agosto de 1995 y una imagen SPOT-P del 14 de Agosto de 1995, por la posibilidad de combinar las dos imágenes en un producto con mejor capacidad de análisis y por la disponibilidad de imágenes en las fechas que mejor se

adecuaban a los propósitos del trabajo (Grignetti *et alii.*, 1997 y Pons, 1992).

Para el análisis de los factores topográficos se generó un MDE (10 m.) utilizando las hojas topográficas 1:10.000 de la Junta de Andalucía. Como información auxiliar para los procesos de clasificación y evaluación de la calidad final del trabajo se empleó la cartografía digital sobre vegetación actual, litología y apeo de rodales de repoblación (E: 1/10.000) generada expresamente para el proyecto de restauración de la zona mediante metodología tradicional (Luque y Navarro, 1998). Durante el verano de 1995 se realizó una campaña de campo según una malla sistemática con 417 *parcelas de validación* en las que se recogió información sobre los factores del medio determinantes para nuestra caracterización ecológica de las estaciones forestales de la zona de estudio (Tabla 1): *tipo de cubierta del suelo, composición dominante de la vegetación, cobertura arbórea, litología, pendiente, orientación y rango altitudinal*. Esta intensidad de muestreo permitió estimar la precisión de las clasificaciones digitales con un nivel de probabilidad del 95 %.

### Tratamientos previos de las imágenes de satélite

Las dos imágenes de satélite utilizadas en este trabajo fueron corregidas geométricamente y remuestreadas mediante el método del *vecino más cercano* utilizando las hojas topográficas 1:10.000 de la Junta de Andalucía.

MDE			TELEDETECCIÓN		
	<i>Pendiente</i>	<i>Orientación</i>	<i>Altitud</i>	<i>Litología</i>	<i>Vegetación</i>
Clase 1	< 60 %	Solana	< 1000 m	Calizas-dolomías	Suelo desnudo
Clase 2	> 60 %	Umbría	> 1000 m	Peridotitas	Fustes quemados
Clase 3				Micaesquistos	Enebrales calizos
Clase 4				Gneises	Enebrales peridotític.
Clase 5					Garriga
Clase 6					Matorral mixto
Clase 7					Vegetación de ribera
Clase 7					Pp fcc < 25 %
Clase 8					Pp fcc > 25 %
Clase 9					Ph fcc < 25 %
Clase 10					Ph fcc > 25 %
Clase 11					Ap fcc < 25 % calizas
Clase 12					Ap fcc > 25 % calizas
Clase 13					Ap fcc < 25 % peridot
Clase 14					Qs fcc < 25 %
Clase 15					Qs fcc > 25 %
Clase 16					Algarrobos
Clase 17					Eucaliptos

**Tabla 1:** Leyendas de trabajo para las cartografías temáticas generadas. (Jsp: enebros; Pp: pino resinero; Ph: pino carrasco; Ap: pinsapo; Qs: alcornoque; fcc: fracción de cabida cubierta).

En la clasificación litológica se empleó la imagen corregida del Landsat 5 TM, para la que se calcularon los cocientes entre bandas 5/7, 3/1, 3/2, 7/4, 1/5, 1/7 y 5/4 de aplicación a las características litológicas de nuestra zona de trabajo (Younis *et alii*, 1991). Para la clasificación de la vegetación se optó por la fusión de la imagen Landsat 5 TM con la SPOT-P Chavez (1991) (Figura 1), tras realizar distintos intentos de clasificación utilizando la imagen Landsat 5 TM en los que se obtuvieron pobres resultados debido a las características típicamente mediterráneas de la zona de estudio (Grignetti *et alii*, 1997).

### Clasificación digital

La existencia de cartografía de detalle actualizada para las variables de interés y la pormenorizada leyenda de trabajo necesaria para la caracterización ecológica de estaciones forestales (Tabla 1) determinó la aplicación de técnicas de *Clasificación Supervisada*.

Durante la fase de entrenamiento, y utilizando como referencia la cartografía digital de Luque y Navarro (1998), se digitalizaron sobre pantalla distintas *parcelas de entrenamiento* de acuerdo con San Miguel y Biging (1996). Como índices de separabilidad estadística empleamos la Divergencia (D), la Divergencia Transformada (DT) y la Distancia de Jeffries-Matusita (JM), orientados al Clasificador de Máxima Probabilidad utilizado. El cotejo entre la cobertura real (parcelas de validación no coincidentes con las de entrenamiento) y la deducida de la clasificación se realizó a través de la Matriz de Error, evaluando la fiabilidad de las clasificaciones a partir de la fiabilidad globales ( $F_G$ ), del usuario ( $F_u$ ), del productor ( $F_p$ ) y del índice Kappa ( $\kappa$ ).

Caracterización ecológica de las estaciones forestales y delimitación de los rodales de restauración

Se desarrolló un modelo para la identificación las estaciones forestales presentes en la zona de estudio en el que se cruza toda la información cartográfica generada mediante teledetección y aquella generada a partir del MDE (Tablas 1 y 2), obteniendo al final del análisis SIG una cobertura de estaciones forestales con información suficiente para decidir sobre el tipo de actuación restauradora que se debe aplicar, delimitar los rodales de restauración y, en base a sus caracteres culturales, establecer qué especies forestales emplear en la restauración.

Tipo cubierta	Composición	foc.	Pte.	Actuación	Orientación	Altitud	Estación
suelos desnudos			<60%	Repoblación	solana		074
					umbria	<1000 m	075
					umbria	>1000 m	076
			<60%	Técnicas especiales	solana		077
					umbria	<1000 m	078
					umbria	>1000 m	079
matorrales			<60%	Repoblación	solana		086
					umbria	<1000 m	087
					umbria	>1000 m	088
			<60%	Técnicas especiales	solana		089
					umbria	<1000 m	090
					umbria	>1000 m	091
serial			<60%	Repoblación	solana		092
					umbria	<1000 m	093
					umbria	>1000 m	094
			<60%	Técnicas especiales	solana		095
					umbria	<1000 m	096
					umbria	>1000 m	097
veg. arborea	Pp		<25%	Repoblación			098
			>25%	T. Especiales			099
			>25%	Selvicultura			100
			<25%	Repoblación			101
			<25%	Repoblación			102
			>25%	T. Especiales			102

Tabla 2. Clave para el modelo de caracterización de estaciones forestales sobre micaesquistos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Clasificación litológica

El índice de JM (valor medio, 898) fue el más riguroso a la hora de discriminar entre las distintas clases, resultando el triplete TM 3/1:3:1 la combinación óptima para llevar a cabo la clasificación. La Matriz de Confusión mostró una  $F_G$  del 89.69% y un índice  $\kappa$  de 0.79, correspondiendo los resultados más pobres de  $F_u$  y  $F_p$  a la clase 3 (72.7 y 59.3 %), producto de una deficiente caracterización espectral provocada por su escasa representación superficial en la zona, inferior a la de las litologías dominantes (clases 1 y 2). La clase 4 quedó sin evaluar, debido a las reducidas dimensiones de las manifestaciones de este material en la zona de estudio, que dificultaron su detección, quedando además fuera de la red de muestreo sistemática.

### Cartografía de las variables de interés sobre la vegetación

El índice de JM (valor medio, 1231), coincidiendo con San Miguel y Biging (1996), dio como combinación óptima el triplete 6:4:1 para discriminar entre las clases de nuestra leyenda (Tabla 1). La matriz de confusión mostró una  $F_G$  del 84.65 % y un valor de  $\kappa$  de 0.81.

Por razones análogas a las expuestas en el caso anterior los resultados más pobres de Fu y Fp pertenecen a las clases con menor superficie relativa (clase 14: 0 y 0%; clase 9: 20 y 100 %; clase 4: 50 y 100%) y algunas clases quedaron sin evaluar (clases 17 y 11) dadas sus reducidas manifestaciones en la zona de estudio

Para simplificar el análisis SIG de la información se generaron tres coberturas temáticas independientes a partir de esta clasificación: 1. *Tipo de cubierta vegetal* (Suelos desnudos, Fustes quemados, Matorrales y Vegetación arbórea); 2. *Composición dominante* (Matorral noble, Matorral serial, Pp, Ph, Ap o Qs) y 3. *Fcc* ( $\phi > 25\%$ ).

Los valores de precisión alcanzados con las dos clasificaciones confirman la capacidad de las imágenes Landsat 5 TM y SPOT-P para el estudio y la cartografía de variables biofísicas en ecosistemas forestales mediterráneos.

### Cartografía de estaciones forestales y de rodales de restauración

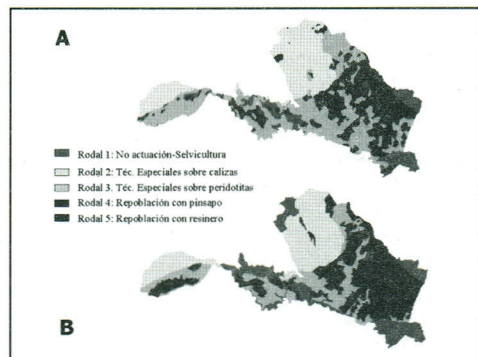
La aplicación del modelo dio como resultado la zonificación del área de trabajo en 45 estaciones forestales, facultando el apeo de rodales de restauración (Figura 2).

Para contrastar la validez del método propuesto y la exactitud de la cartografía final generada se llevó a cabo la tabulación cruzada entre ésta y el apeo de rodales de restauración producido por vía tradicional (Figura 2). Aunque las líneas seguidas en ambos trabajos difieren en aspectos metodológicos y en criterios de decisión sobre las actuaciones a realizar y la elección de especie, las propuestas de restauración muestran un elevado grado de coincidencia para la mayoría de los rodales de restauración (Tabla 3), donde la superficie confusa entre rodales equivalentes es inferior al 25 % en los rodales 1, 2 y 5. No obstante, se observa que el desacuerdo responde en gran medida al lógico desfase geográfico que existe entre sus límites; así, los rodales que comparten mayor perímetro fronterizo presentan mayor superficie confusa (rodales 3 y 5). Destacamos que el bajo porcentaje que presenta el rodal 4 responde a los diferentes criterios técnicos de restauración de las estaciones favorables para pínasapo con pendiente superior a la fijada como limitante para la repoblación en este trabajo, en el que los criterios de elección de especie que hemos seguido para llevar a cabo técnicas especiales de restauración han sido menos selectivos.

RODALES	Solape entre rodales	Mayor confusión por rodales		Superficie confusa (ha)
1	81.8 %	5 (8.6 %)	3 (7.2 %)	44
2	88.4%	1 (8.9 %)	4 (1.8 %)	74
3	41.7 %	5 (30.8 %)	1 (12.0 %)	530
4	7.6 %	1 (32.0 %)	2 (24.5 %)	22
5	77.8 %	3 (11.5 %)	1 (6.6 %)	174

**Tabla 3.** Estadísticas de solape entre rodales de restauración equivalentes. (1. No actuación-Selvicultura; 2. Técnicas especiales sobre calizas; 3. Técnicas especiales sobre peridotitas; 4. Repoblación con Ap; 5. Repoblación con Pp).

La similitud de las propuestas elaboradas en la aplicación de los dos métodos (59.5 % y 72.4 % sin considerar el caso comentado) demuestran la valía de las técnicas de teledetección espacial en el campo de la restauración forestal.



**Figura 1.** Rodales de restauración. A: asistido por teledetección; B: método tradicional.

### BIBLIOGRAFÍA

- CHAVEZ, S. (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (57) 3: 295-303.
- FRANKLIN, J., WOODCOCK, C. E. y R. WARBINGTON (2000) Multi-attribute vegetation maps of Forest Service lands in California supporting resource managements decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (66) 10: 1209-1217.
- GRIGNNETTI, A., SALVATORI, R., CASACCHIA, R. y F. MANES (1997) *Mediterranean vegetation analysis multi-temporal satellite sensor data. International Journal of Remote Sensing* (18) 6: 1307-1318.

- LUQUE A. y R. M. NAVARRO (1998) *Proyecto de restauración forestal del área incendiada de los montes de Tolox. (P. N. de la Sierra de las Nieves)*. ETSIAM. Córdoba.
- NAVEH, Z. (1975) The evolutionary significance of fire in the mediterranean region. *Vegetatio* 29: 199-208.
- PEMÁN, J. y NAVARRO, R. M. (1998) *Re poblaciones Forestales*. Universitat de Lleida. Lleida.
- PONS, X. (1992) *Aportacions a la teledetecció i als sistemes d'informació geogràfica en estudis de vegetació*. Tesis doctoral. Dpto. de Biología Animal, Vegetal y de Ecología. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona.
- PU, R. y Y. FANG (1992) Application of remote sensing techniques to forest site survey. *Geocarto International* 3: 19-24.
- PU, R. y J. R. MILLER (1991) Classifying and evaluating a shelter forest site in a coastal area using remote sensing techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing* 4: 323-331.
- SAN MIGUEL, J. y G. S. BIGING (1996) An iterative classification approach for mapping natural resources from satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* (17) 5: 957-981.
- YOUNIS, M. T., MELIA, J., BASTIDA, J. y S. GANDÍA para la discriminación litológica en el área de Alcantarilla (Murcia). En: Consejería de Medio Ambiente (Ed.) *IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*. Junta de Andalucía. Sevilla.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Servicio de Información y Evaluación Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía) por la cesión de las imágenes de satélite y al personal técnico de la Delegación Provincial de Medio Ambiente de Málaga por la ayuda prestada durante los trabajos de campo.