

## Tesis doctorales

**Título:** *Análisis y cartografía de las propiedades de los combustibles mediante teledetección y Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.).*

**Autor:** David RIAÑO ARRIBAS.

**Lugar:** Universidad de Alcalá. Departamento de Geografía. Programa interdepartamental de doctorado en Ciencias Ambientales.

**Fecha:** Marzo, 2002.

**Director:** Emilio CHUVIECO SALINERO.

Esta tesis doctoral se centra en la estimación de algunas propiedades de los combustibles utilizando información obtenida mediante teledetección y S.I.G. En concreto, se estudian una serie de variables que se consideran de gran importancia en alguna de las tres fases de la gestión de incendios forestales: antes, durante y después del evento. La principal propiedad a tener en cuenta antes y durante el incendio es la distribución del combustible y su contenido de humedad, en tanto que la más relevante una vez ha finalizado éste es el tipo de formación vegetal que haya sido afectada.

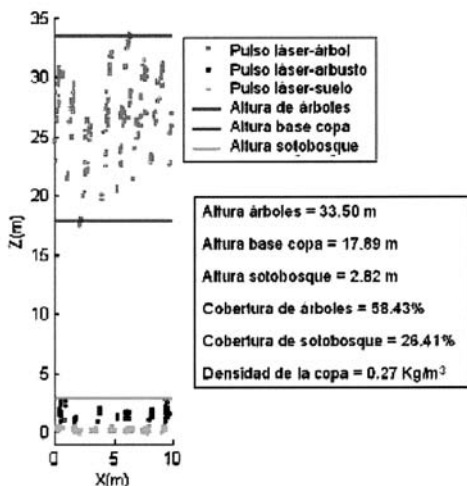
Teniendo en cuenta estas consideraciones, el capítulo introductorio de la tesis se centra en el análisis del papel de la teledetección en la caracterización de las propiedades del combustible más importantes en la gestión de incendios. En los capítulos siguientes, se presentan cinco casos de estudio en los que se utiliza la teledetección y los S.I.G. para la caracterización de estas propiedades del combustible:

1. *La evaluación de las correcciones topográficas en imágenes Landsat-TM* (Parque Nacional de Cabañeros) sirve como paso previo para la cartografía de modelos de combustible. Se ensayaron diferentes métodos de corrección topográfica: un método basado en la iluminación de cada píxel y la iluminación media del área de estudio; otro basado en la ecuación de Minnaert; y el tercero basado en la estimación de una constante empírica  $C$ . Finalmente, este último se suavizó aumentando la iluminación mediante la disminución de la pendiente. Este método (corrección  $C$  suavizada) fue el que mejor corrigió el efecto topográfico. Una vez seleccionado este método, se evaluó, mediante una simulación Monte Carlo, la influencia del grado de error del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en la corrección topográfica. Utilizando un MDE con un

error de 9 m se obtuvo un error inferior al 1 % de reflectividad en la corrección topográfica, siendo menor en las bandas visibles y mayor en las del infrarrojo cercano y medio de la imagen.

2. *La cartografía de modelos de combustible en ecosistemas mediterráneos mediante imágenes Landsat-TM e información auxiliar* (Parque Nacional de Cabañeros). Se presentan diversos métodos para la cartografía de modelos de combustible mediante teledetección a una escala espacial y temporal adecuada para aplicaciones operativas de gestión de incendios. Los modelos de combustible consideran las características estructurales de la vegetación relacionadas con el comportamiento y propagación del fuego. En este estudio se utilizó un sistema de clasificación de modelos de combustible adaptado a las características ecológicas de la cuenca mediterránea europea. Se aplicó un análisis de sensibilidad para determinar las bandas más idóneas para la cartografía de modelos de combustible. La clasificación final se verificó mediante trabajo de campo, obteniendo una fiabilidad global del 83 %. El principal problema de la clasificación fue la discriminación de los modelos de combustible que diferían únicamente en la altura de la vegetación o en la composición del estrato inferior.

3. La discriminación de la altura de la vegetación y el estrato inferior se afrontó en un estudio local en el que se realizó *la modelización de datos de escáner láser aerotransportado para la generación de parámetros forestales determinantes en el modelado del comportamiento del fuego* (Ravensburg, Alemania). Los datos de salida que aparecen en un formato espacial que puede utilizarse como entrada en modelos de comportamiento del fuego. Un algoritmo, basado en un análisis de cluster, permite identificar la altura de la base de la copa (Figura 1). Se



**Figura 1.** Estimación de diversos parámetros forestales determinantes en el modelado del comportamiento del fuego.

obtienen dos grupos de datos láser: arbolado y sotobosque. Los puntos láser se identifican como suelo si el valor de altura es menor de 0.6 m. La altura del arbolado es el percentil 99 del grupo de arbolado. La altura de la base de las copas es el percentil 1 del grupo de arbolado. El porcentaje de cobertura se calcula como la división entre el total de pulsos que chocan con los árboles y el total de pulsos láser. La altura de la vegetación de superficie es el percentil 99 del grupo de pulsos clasificados como vegetación de superficie. El porcentaje de cobertura de vegetación de superficie se calcula como la división entre el número de pulsos que chocan con la vegetación de superficie y el número total de pulsos, una vez que se corrige el perfil del porcentaje de cobertura a cada altura, en el caso de que la vegetación de superficie esté ensombrecida por los árboles. La densidad de las copas se estima a partir de la biomasa de las copas y del volumen que ocupan. Se requieren ecuaciones empíricas para la estimación de la biomasa de las copas. El volumen de las copas se estima en función de la distancia entre la base de la copa y la altura de los árboles, el área y el perfil corregido de la cobertura a cada altura.

**4. La estimación del contenido de humedad mediante el análisis multitemporal de imágenes Landsat-TM y sus aplicaciones en la evaluación del peligro de incendio forestal** (Parque Nacional de Cabañeros). Se generaron índices para estimar el contenido de humedad de combustibles vivos mediterráneos para la predicción del peligro de incendio forestal. Se procesaron siete imágenes Landsat-TM, que fueron correlacionadas con el contenido de

humedad del combustible (FMC) medido en terreno para varias especies (vivas) de pastizal y matorral mediterráneo. Las mejores estimaciones se obtuvieron con los índices basados en las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR: 1,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ ) y en el contraste entre esta banda y el infrarrojo cercano. Para el pastizal, la integral de las bandas visible y SWIR obtuvo la mayor correlación, aunque los índices obtenidos a partir de los datos brutos de reflectividad y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) también ofrecieron valores significativos de correlación ( $r^2 > 0,8$ ). Para las especies de matorral, los índices que incluían el SWIR obtuvieron mejores resultados que los del NDVI, ya que el SWIR es más sensible a la absorción del agua, mientras que el NDVI estima el FMC indirectamente, a partir de los efectos de los cambios de clorofila debidos a la variación del contenido de agua y el índice de área foliar.

**5. La evaluación de la regeneración de la vegetación post-incendio mediante el análisis multitemporal de imágenes AVIRIS (sensor hiperespectral aerotransportado).** En este caso, se utilizó el Análisis de Mezclas Espectrales (SMA) de imágenes AVIRIS para el estudio de los patrones de regeneración post-incendio en dos comunidades de matorral semiárido de las Montañas de Santa Mónica, California: chaparral mixto septentrional y matorral litoral de salvia. Se comparó el SMA con los resultados del NDVI para valorar la regeneración de la vegetación. Se utilizó una zona de control no quemada (en los últimos 20 años), con características ambientales similares, para generar índices de regeneración relativos: el Índice de Regeneración (RI) y el Índice de Regeneración Normalizada (NRI). Los índices se calcularon utilizando el componente puro de Verdor Vegetal (GV) y el NDVI. Se combinó la evolución de dos incendios para tener un periodo de observación mayor y se realizó el ajuste mediante un modelo de regresión logarítmica para cada una de las comunidades de matorral mediterráneo. El Índice de Regeneración Normalizada del componente puro de Verdor Vegetal ( $\text{NRI}_{\text{GV}}$ ) obtuvo la mejor estimación para el período de regeneración en ambas comunidades de acuerdo con los tiempos de regeneración presentes en la literatura especializada. El uso de NDVI obtuvo buenos resultados con el chaparral mixto septentrional, pero no tan buenos para el matorral litoral de salvia, debido principalmente a la presencia de una cubierta extensiva de herbáceas en los primeros años del proceso de regeneración. Los componentes puros generados desde las imágenes hiperespectrales ofrecían mayor exactitud porque estaban ajustados para captar el verdor del matorral.

**Título:** *Desarrollo de un SIG orientado a la identificación de prospectos de yacimientos metálicos y su aplicación al sureste de la provincia de Badajoz.*

**Autor:** Carlos HERNÁNDEZ MEDINA.

**Lugar:** Departamento de Estratigrafía, Universidad Complutense de Madrid.

**Fecha:** 5 Julio, 2002.

**Director:** Juan José GÓMEZ FERNÁNDEZ y Ricardo RINCÓN MARTÍNEZ.

Los trabajos de exploración minera se realizan en las etapas iniciales sobre áreas muy extensas, e implican el análisis de numerosas capas de información de distinta índole: geología, indicios mineros, información obtenida mediante medios geofísicos, geoquímica, teledetección, etc. con el fin de identificar aquellas áreas con un mayor potencial para contener yacimientos minerales y pasar a trabajos de más detalle en estos prospectos.

Anteriormente a la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la selección de prospectos mineros se realizaba superponiendo en una mesa de luz las distintas capas de información cartografiadas en papeles transparentes, con las limitaciones que ello implica.

Algunos de los avances técnicos, como la informatización y la teledetección, están contribuyendo a una mejora sustancial en el conocimiento y en la representación cartográfica de los datos geológicos, geofísicos, geoquímicos, ambientales, la distribución de Derechos Mineros, etc. utilizados en las distintas fases de la actividad minera.

Tras varios siglos de minería intensiva en la Península Ibérica, el volumen de datos geológico-mineros generado es muy amplio. Además éstos se multiplican constantemente a partir de estudios promovidos por los organismos públicos, con objetivos investigadores, infraestructurales y prospectivos, y a los trabajos de exploración realizados por numerosas compañías privadas mineras y petroleras.

Esta gran cantidad de información, procedente de fuentes y tipos muy diversos, y en su mayoría de dominio público, hace que los SIG sean una pieza clave en un nuevo estilo de prospección de recursos geológicos, permitiéndonos la recopilación, procesado, integración y análisis de la información existente, con el fin de poder seleccionar nuevas áreas de interés, tanto en las etapas de exploración / investigación como en la fase de explotación.

En el trabajo que presentamos se ha desarrollado un Sistema de Información Geográfica (SIG) y la

metodología necesaria para la identificación de prospectos con potencial para contener yacimientos de metales base o de metales preciosos.

Esta metodología se ha aplicado en el SE de la provincia de Badajoz, abarcando nueve hojas topográficas a escala 1:50.000, situándose geológicamente en la Zona de Ossa-Morena, en su límite septentrional con la Zona Centroibérica.

Se recopilaron, procesaron e integraron en el SIG 54 capas de información georreferenciadas, cuyas temáticas principales son: topografía, geología, datos geofísicos –tanto aeromagnéticos / radiométricos como gravimétricos–, indicios mineros, teledetección, geoquímica, análisis de lineamientos, etc.

En el apartado del tratamiento de la información cabe destacar el procesado realizado al vuelo aeromagnético / radiométrico de la Junta de Energía Nuclear que nos permitió efectuar una caracterización magnética y radiométrica de las distintas unidades litoestratigráficas y cuerpos geológicos, así como la identificación de cuerpos magnéticos tanto en superficie como en profundidad. Para la comprobación en campo de los datos aeromagnéticos se efectuaron medidas de la susceptibilidad magnética, estudios petrográficos y análisis de difracción de rayos X.

La imagen del satélite Landsat TM ha sido procesada específicamente, mediante diversas técnicas –análisis selectivo de componentes principales, análisis de regresión múltiple, etc.–, para cartografiar zonas que han sufrido procesos de alteración hidrotermal. Para su identificación hemos distinguido áreas ricas en óxidos de hierro –fundamentalmente limonita– y áreas ricas en arcillas asociadas a procesos hidrotermales, ya que los materiales que las componen poseen características espectrales que permiten su discriminación a partir de la información proporcionada por la imagen de satélite.

Una vez cartografiadas las anomalías espectrales en limonita y en arcillas asociadas a procesos hidrotermales es necesario verificar en campo su origen y naturaleza. En este trabajo de investigación se ha

perfeccionado una metodología para su validación mediante estudios edafológicos –análisis texturales y de color de los suelos– basados en la identificación de los minerales índice de la existencia de alteraciones hidrotermales.

Como muchos yacimientos metálicos se encuentran asociados a sistemas de fracturas realizamos un análisis de los lineamientos interpretados en la imagen de satélite y en los mapas aeromagnéticos y de las estructuras geológicas cartografiadas, obteniendo las direcciones estructurales predominantes y las zonas con una mayor densidad de lineamientos.

Utilizando el SIG como una herramienta de apoyo a las decisiones y mediante el análisis y cruce de toda la información incluida en nuestra base de datos georreferenciada, seleccionamos los tres pros-

pectos mineros de la zona de estudio con mayor potencial para albergar yacimientos de metales base y metales preciosos. En estas tres zonas seleccionadas se efectuó una recopilación de todos los trabajos previos y un estudio de mayor detalle, comprobando su interés como prospectos mineros.

Para la visualización y consulta de toda la información tratada en este trabajo se ha diseñado y desarrollado una aplicación ejecutable, a la que hemos denominado ORESTES, que incluye las operaciones de análisis más comunes en los SIG y es una aplicación personalizada de aprendizaje y uso relativamente sencillo. Este tipo de aplicación informática supone un importante avance en la difusión de trabajos de investigación que incluyen cartografía o cualquier otra clase de información georreferenciada.

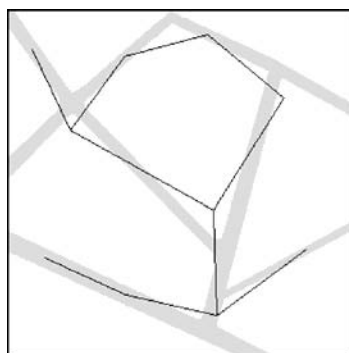
## Fe de erratas

• En el número 16 de la Revista de Teledetección, nuestro asociado Juan Jorge Sánchez publicó un artículo en colaboración con otros autores y su primer apellido –Jorge– se consideró nombre. El error se produjo en la página 41 y en las cabeceras de las páginas pares. Pedimos disculpas al error. La referencia correcta es:

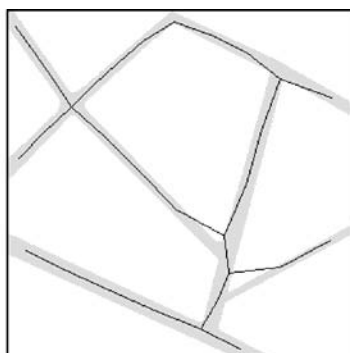
PINEDA, L. JORGE, J. GARRIDO, L. y SALEMBIER, P. 2001. Estudio de campos de golf mediante técnicas de segmentación. *Revista de teledetección*. 16: 41-46.

• En el número 17 de la Revista de Teledetección, el artículo publicado por J. B. Mena titulado: Vectorización automática de una imagen binaria mediante K-means y degeneración de la triangulación Delaunay, tiene un error en la figura 6. La figura 6 está compuesta por cuatro imágenes distintas (a,b,c,d) y en el texto aparecen las cuatro imágenes a y no las b, c y d. Disculpas al autor. Se reproduce la imagen correcta

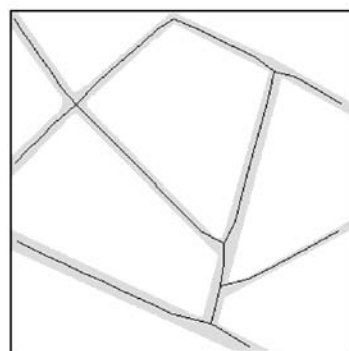
**Figura 6:** Rectificación



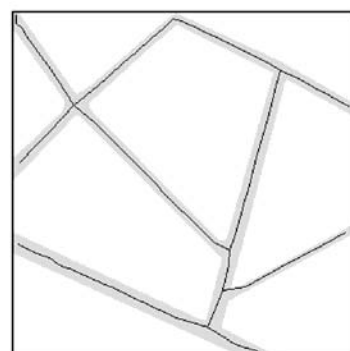
6.a.  $K=10, T(10, 0)$ .



6.b.  $K=30, T(30, 0)$ .



6.c.  $K=60, T(56, 0)$ .



6.d.  $K=90, T(78, 0)$ .