

LOS PAISAJES EROSIVOS EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO CIDACOS (LA RIOJA, ESPAÑA). UNA APROXIMACIÓN CARTOGRÁFICA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DATOS DE SATÉLITE Y MDT*.

F. PÉREZ-CABELLO¹
DAVID NOGUÉS²

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar una cartografía del grado de erosión en un sector de la cuenca media del río Cidacos (La Rioja, España), integrando información radiométrica (Landsat ETM+), variables topográficas derivadas de un MDE y trabajo de campo.

Se realiza una cartografía de tipos de cubierta mediante un procesos de clasificación supervisada (método de máxima verosimilitud), para posteriormente integrarla en un modelo de clasificación en árbol, donde se consideran parámetros topográficos como la pendiente y la curvatura. Las diferentes reglas de decisión aplicadas en el modelo tiene en cuenta las interacciones entre el binomio pendiente-cubierta y la componente espacial de la morfología topográfica obtenida a través de la aplicación de filtros texturales.

Se concluye que el establecimiento previo de una cartografía de tipos de cubierta y el aislamiento de los componentes morfo-topográficos de alta frecuencia, ofrecen resultados satisfactorios en trabajos a mesoescala (bondad de la clasificación 75%).

Palabras claves: grados de erosión, clasificación supervisada, ETM+ landsat, clasificador en árbol.

The aim of the research is to map erosion levels in a sector located in the medium basin of Cidacos river (La Rioja, Spain), considering radiometric data (Landsat ETM+), topographic variables calculated with a DEM and field data.

Landcover mapping is made using a supervised classification (maximum likelihood method) in order to included it in a decision tree classification model, where

* Registrado el 24 de octubre de 2002. Aprobado el 13 de enero de 2003.

1. Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio (Universidad de Zaragoza). 50009 - Zaragoza.

2. Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Apdo. 202. 50080 - Zaragoza.

topographic data -curvature and slope- are also considered. The different decision rules used in the model take into account the interactions between the binomial slope-landcover and the spatial components of the topographic morphology calculated with a textural kernel application.

It is concluded that the previous establishment of the landcover mapping and the isolation of the high frequency morphotopographic components offer good results at medium scale works (accuracy assessment 75%).

Keywords: erosion levels, supervised classification, ETM+ Landsat, decision tree classifier.

0. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la planificación territorial, la utilización de nuevas técnicas cartográficas y la disponibilidad de fuentes de información digital sobre el medio físico se ha desarrollado paralelamente al incremento de la demanda de modelos a escala regional para simular y predecir procesos ambientales (De Jong et al., 1999). Entre las fuentes de información destacan especialmente las imágenes multiespectrales y los Modelos Digitales del Terreno (MDT). Durante la última década se han elaborado toda una serie de estudios que demuestran la potencialidad de los MDT para explicar la distribución de un gran número de procesos y variables ambientales (Del Barrio y Boer, 1996; García-Ruiz, et al., 1996). Del mismo modo, los datos multiespectrales se han convertido en un tipo de información aplicada profusamente en la observación y la diagnosis de la superficie terrestre, lo que ha impulsado definitivamente la predicción de variables cuantitativas en muchas temáticas ambientales (Salvador, 1999).

Uno de los procesos más analizados mediante este tipo de modelos, dada su trascendencia en la fijación de los recursos naturales y la gravedad que adquiere en nuestras latitudes, es la distribución de la pérdida de suelo¹.

En España, el proyecto "LUCDEME" (Lucha Contra la Desertización en el Mediterráneo) inicia el desarrollo y la aplicación de metodologías para la cualificación de los paisajes erosivos, mediante el estudio de los factores implicados (MAPA, 1982). En este proyecto se explora por primera vez la aplicabilidad de las imágenes de satélite en los estudios sobre la regionalización de la erosión. Si bien con imágenes de resolución espacial media la observación directa de las principales morfologías de la actividad erosiva (*Sheet wash, gullies* y *rills*) no es del todo precisa, sí lo es en cambio la cartografía de los factores ambientales -antrópicos y físicos- que favorecen su desarrollo (Metternich y Zinck, 1998), permitiendo en muchas ocasiones su inserción en modelos de simulación más específicos (Pérez-Cabello y De la Riva, 1998; De Jong et al., 1999).

El principio básico de este potencial se basa en las distintas respuestas espectrales de los diferentes tipos de cubierta y de algunos de los indicadores de degra-

1. Según el mapa de estados erosivos de La Rioja (Plan Estratégico de Conservación del Medio Natural de La Rioja), el valor medio de las pérdidas de suelo en la región asciende a 25 tm/ha/año y, aunque 2/3 de la superficie regional arroja valores inferiores, la suma de las superficies con pérdidas de suelo alta suponen algo más de 155.000 has, lo que da buena cuenta de la entidad de este problema (Gobierno de La Rioja, Consejería de Turismo y Medio Ambiente, 2001).

dación (pedregosidad superficial, recubrimiento vegetal) siendo las bandas del visible y del infrarrojo los canales mejores para evaluar este último extremo (King y Delpont, 1993). La incorporación de variables topográficas puede beneficiar la detección de zonas degradadas, toda vez que los principales factores que controlan la erosión a escala regional se asocian a parámetros topográficos y a su interacción con las características de la cubierta vegetal; su consideración a la hora de generar cartografías a mesoescala está ampliamente justificada y demostrada en la bibliografía (Moreira, 1991).

Entre las variables topográficas, el ángulo de pendiente y la morfología topográfica son dos de los factores más determinantes de generación de escorrentía (Perles, 1997). El ángulo de la pendiente controla la energía cinética del agente erosivo, la capacidad de infiltración y las condiciones de sedimentación. Por su parte, la morfología topográfica modifica la incidencia superficial y la intensidad de los procesos erosivos en función de la pendiente. Además, el incremento de la pendiente en las morfologías suele traducirse en una aceleración de la pérdida de material, produciéndose un efecto interactivo de tipo sinérgico entre pendiente y morfología topográfica.

No obstante, el efecto topográfico sobre la erosión puede ser contrarrestado por la cobertura vegetal, ya que ésta es capaz de neutralizar la morfodinámica derivada de la acción de la gravedad. La vegetación, y en concreto su densidad, suele vincularse a una mayor conservación del suelo y en consecuencia, a una disminución de las pérdidas por erosión (Puigdefábregas, 1996).

La integración de datos radiométricos y de información topográfica en el contexto de clasificadores supervisados y en árbol (*decision tree classifier*), capaces estos últimos de discriminar secuencialmente tipos de cubierta a partir de variables auxiliares (Friedl y Brodley, 1997), posibilita la espacialización de los niveles de erosión. En cualquier caso, parece perentorio la comprobación en el campo de las relaciones entre dichos niveles y las características de los procesos de erosión (Metternicht y Fermont, 1998).

La aplicación de clasificadores de máxima verosimilitud basándose en áreas de entrenamiento ha sido utilizada por otros autores para discriminar rasgos de erosión edáfica (Metternicht y Zinck, 1998). En la bibliografía encontramos trabajos y experiencias en los que se integra la información proveniente de sensores remotos y de modelos digitales del terreno para producir cartografías sobre la actividad erosiva a escala regional. *The Soil Erosion model for Mediterranean regions* (SEMED) (De Jong et al., 1999) es un ejemplo que, utilizando el modelo conceptual de Meyer y Wischmeier (1969), está concebido para la planificación del uso del suelo.

En este contexto, el objetivo principal del trabajo es realizar una aproximación cartográfica de la distribución de los *paisajes erosivos* (zonas en las que el fenómeno erosión presenta características similares), mediante el empleo de datos de satélite (sensor ETM+) y el empleo de informaciones derivadas de un MDT, en una zona situada en la cuenca media del río Cidacos. En este sector de la Rioja las pérdidas estimadas se sitúan en torno a las 32.5 tm/ha/año, siendo la distribución de

2. La equivalencia de cada una de las bandas del ETM+ y el espectro electromagnético se realiza en los siguientes términos: Banda 1, azul (0.45 a 0.52 μm); Banda 2, verde (0.53 a 0.61 μm); Banda 3, rojo (0.63 a 0.69 μm); Banda 4, infrarrojo cercano (0.78 a 0.90 μm); Banda 5, infrarrojo medio (1.55 a 1.75 μm); Banda 6, infrarrojo térmico (10.4 a 12.5 μm); Banda 7, infrarrojo lejano (2.09 a 2.35 μm).

la intensidad muy heterogénea (Gobierno de la Rioja, Consejería de Turismo y Medio Ambiente, 2001).

1. EL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se circunscribe básicamente al tramo inferior de la cuenca media del río Cidacos, incluyendo un pequeño sector correspondiente al bajo Cidacos. Las localidades de Arnedo, Quel y Autol, distribuidas de Oeste a Este a lo largo del río, son los principales núcleos de población, y de la comarca donde se inscriben -La Rioja Baja- (figura 1).

Desde el punto de vista morfoestructural la zona de estudio se articula en tres grandes unidades: la Depresión de Arnedo; la orla montañosa circundante constituida por las sierras de Cumbre, Yerga, Valdelavía, y Bergasa; y los llanos del sector nororiental del bajo Cidacos. La Depresión de Arnedo se identifica con una gran hoya de piedemonte excavada sobre litologías detríticas groseras, con cambios rápidos y frecuentes de facies -Formaciones Autol y Arnedo de edad oligo-mioceno-sedimentadas en el borde camerano. El río recorre esta gran hoya abriendo un valle disimétrico. La margen derecha, constituida por un importante sistema de glaciares escalonados desde los 700 m (Gonzalo, 1981), presenta una mayor extensión y aparece disecada por una serie de "yajas" -denominación local de las barranqueras de funcionamiento esporádico-. La orla montañosa conforma los depósitos conglomeráticos vindobonienses de la facies Santurdejo -discordantes sobre la serie oligocena-, que arman las Sierras de Yerga (1011 m) Valdelavía (1100 m) en la margen derecha del Cidacos- y Bergasa (900 m) y Navalcuerce (680 m) en la margen izquierda. Los relieves del sector nororiental se corresponden con la llanura de inundación del bajo Cidacos, los sistemas de glaciares abiertos hacia la Depresión de Tudelilla, el interfluvio de los Agudos (644 m) -que separa el Cidacos de los Llanos de Aldeanueva- y las formaciones evaporíticas de carácter yesífero situadas justo al norte de la localidad de Autol.

Climáticamente la cuenca del Cidacos, a sotavento de las influencias oceánicas, presenta una clara componente mediterránea, con temperaturas medias anuales de 11-12° C -bajando en las zonas más elevadas hasta los 9-10° C- y unas precipitaciones en torno a los 500-700 mm -matizadas por la topografía-; una marcada amplitud térmica y una gran estacionalidad. Todo el conjunto presenta un déficit hídrico en torno a los 200 mm (balance hídrico global negativo). Bioclimáticamente, el área de estudio se inscribe en la Región Mediterránea (Rivas-Martínez et al., 1987), en el piso mesomediterráneo dominado por los bosques esclerófilos. No obstante, las formaciones vegetales dominantes son los matorrales mediterráneos basales de carácter heliófilo y xerófito correspondientes a las etapas de sustitución de los carrascales mediterráneos. En el sector nororiental del tramo superior del Bajo Cidacos dominan las comunidades vegetales adaptadas a suelos yesíferos dominados por *Salsola vermiculata*, *Atriplex halimus*... Una serie de masas repobladas, concebidas para la restauración del funcionamiento hidrológico y geomorfológico, se extienden por las laderas de Yerga.

Desde el punto de vista de la erosión, las prácticas agrícolas, la deforestación y el sobrepastoreo a los que se ha visto sujeta esta zona, han intensificado los procesos erosivos aumentando considerablemente en algunos sectores la pedregosidad superficial, la pérdida de potencialidad productiva y la aparición puntual de zonas fuertemente degradadas.

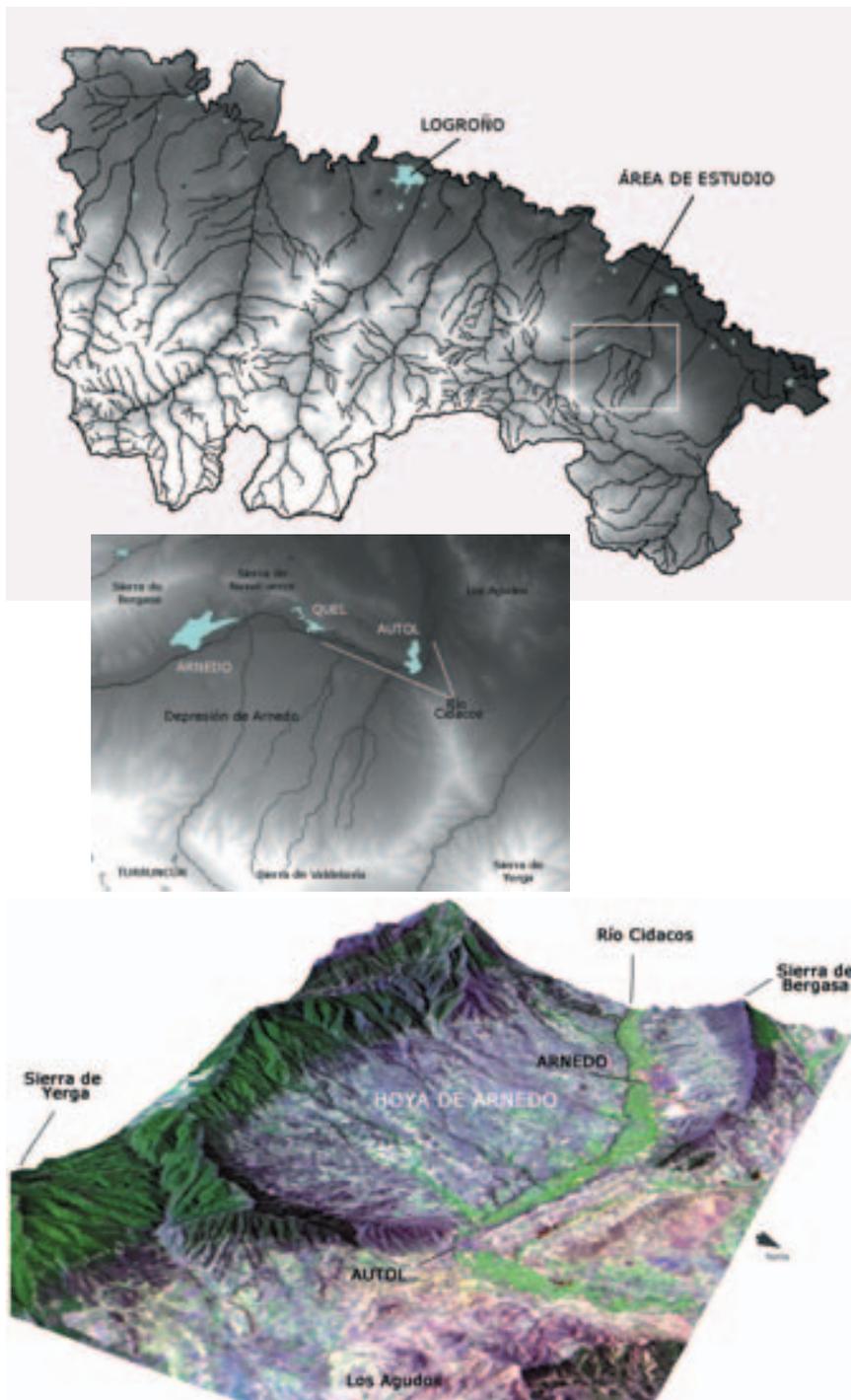


Figura 1. Localización del área de estudio.

2. FUENTES DE INFORMACIÓN DIGITAL Y DATOS DE CAMPO

Se ha utilizado una imagen del satélite Landsat-7 ETM+ (*path* 200-*row* 31) del 19 de septiembre de 2001, cedida por el Dpto. de Geografía de la Universidad de La Rioja, y un modelo digital de elevaciones con una resolución espacial de 10 m. El sensor ETM+ recoge información multispectral de una superficie cuadrangular de 183 km de lado en 8 bandas espectrales: tres visibles y tres infrarrojas, con una resolución espacial de 30 m, una banda en el térmico y un canal pancromático de 15 m de resolución espacial².

La conversión de los niveles digitales de la imagen a valores de reflectividad proporciona una mayor consistencia a los resultados del uso de este tipo de información. Sin embargo, en este trabajo, dado que no se persigue la comparación con imágenes de diferente fecha ni la extracción de parámetros físicos determinados, sólo se ha corregido el efecto de la dispersión atmosférica mediante el método *Histogram Minimum Method* (HMN), consistente en la sustracción a todos los niveles digitales del valor mínimo hallado en cada banda.

El Modelo digital de elevación (resolución de 10 m) se ha elaborado a partir de la cartografía topográfica básica del SIGAR (Sistema de información Geográfica de la Comunidad Autónoma de La Rioja)³. Del mismo sistema de información se ha extraído una serie de orto-imágenes (escala 1:5000) que han sido utilizadas para los procesos de selección de áreas de entrenamiento y de verificación de resultados.

La información de campo, utilizada tanto para realizar el proceso de validación de la cartografía final resultante como para reconocer las características de la erosión en este sector, consiste en 56 observaciones geo-referenciadas recolectadas durante la estación seca mediante GPS (*Garmin GPS II plus*). En cada observación se describen los tipos y la incidencia de los procesos erosivos en relación con una serie de clases de cubierta. La determinación de los tipos de erosión se ha efectuado mediante un sistema de códigos para su identificación en el campo (Morgan, 1997). Los niveles considerados se recogen en la tabla 1.

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE LOS GRADOS DE EROSIÓN.

GRADO DE EROSIÓN	DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS EROSIVOS DOMINANTES
EROSIÓN NULA	Dominio de los procesos de infiltración sobre los de escorrentía
EROSIÓN LIGERA	Erosión por salpicadura y de tipo laminar. Remoción muy superficial y puntual de los niveles edáficos externos.
EROSIÓN MEDIA	Dominio de los procesos de erosión de tipo laminar difuso. Pueden existir redes anastomosadas o trenzadas que presentan canalizaciones poco marcadas. Remoción superficial y esporádica de los niveles edáficos externos. Puntualmente pueden aparecer raíces expuestas.
EROSIÓN SEVERA	Truncamiento total de los perfiles edáficos; exposición litológica. Rápida alternancia de tramos llanos, cóncavos y convexos. Derrumbes, procesos de erosión remontante ligados a descalzamientos basales en zonas de cauces permanentes o de funcionamiento esporádico.

3. Información geográfica pública y gratuita propiedad del Gobierno de La Rioja.
<http://www.larioja.org/sig>, Dirección General del Medio Natural. © 2002 Gobierno de La Rioja.

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada, concebida dentro de las técnicas de teledetección, consiste en la aplicación de un clasificador supervisado, basado en funciones de verosimilitud estadística, y en el desarrollo de discriminadores en árbol, partiendo tanto de la información espectral proveniente de la imagen (bandas originales y canales artificiales) como de las variables topográficas derivadas del MDT. En la tabla 2 se recoge esquemáticamente el proceso metodológico aplicado en función de los objetivos y resultados parciales perseguidos.

En la primera fase metodológica, el proceso de clasificación supervisado se inicia con la definición de una leyenda de tipos de cubiertas existentes en la zona (tabla 3) pero teniendo en cuenta la actividad erosiva dominante en cada uno de ellas; se parte de la hipótesis de que existe una correlación entre usos del suelo y procesos morfogenéticos actuantes. La definición de los diferentes sistemas de ocupación-erosión resulta del análisis de la cartografía temática existente sobre la zona y de la realización de una serie de prospecciones visuales en el campo. A continuación se identifican en el campo una serie de áreas de entrenamiento (*Training fields*), que se introducen en la imagen a partir de un proceso de digitalización en Erdas Imagine 8.4, con el apoyo de ortofotos a escala 1:5000 -disponibles en el SIGAR-.

La conveniencia del conjunto de clases espectrales así definida se ha evaluado mediante la matriz de contingencia, que muestra el porcentaje de píxeles que resultarían bien clasificados dentro del conjunto de píxeles utilizados para el entrenamiento.

La adecuación de cada una de las clases espectrales y sus aportaciones se evalúa mediante procedimientos estadísticos que valoran cuantitativamente su aportación en el proceso final. En este caso se ha utilizado la divergencia estadística transformada (Swain y Davis, 1978) y la distancia de *Jeffries-Matusita* (Thomas et al., 1987), expresiones cuantitativas de la separabilidad y confusión entre clases.

TABLA 2. ESQUEMA METODOLÓGICO APLICADO.

OBJETIVO	METODOLOGÍA EMPLEADA	RESULTADO
DISCRIMINACIÓN DE LOS TIPOS DE CUBIERTAS	<p><u>Método de Clasificación Supervisado</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Documentación descriptiva del área de estudio y prospecciones visuales en el campo sobre los procesos de erosión dominantes. - Determinación de áreas de entrenamiento mediante trabajo de campo y el empleo de ortofotos 1:5000. - Análisis de confusión espectral; utilización del NDVI, cocientes entre bandas - 3/1, 5/7, 5/4- y bandas originales. - Asignación mediante el método de máxima verosimilitud. 	Cartografía de la distribución de los tipos de cubierta
ESPACIALIZACIÓN DEL GRADO DE EROSIÓN	<p><u>Clasificador en árbol</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Generación de variables topográficas. - Determinación de las hipótesis y reglas de decisión. - Aplicación de las reglas a la cartografía de la distribución de los tipos de cubierta. 	Cartografía de la distribución de los grados de erosión
VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS	<u>Trabajo de campo</u>	Determinación del grado de fiabilidad

TABLA 3. TIPOS DE CUBIERTA Y ACTIVIDAD EROSIVA DOMINANTE.

	TIPO DE CUBIERTA	ACTIVIDAD EROSIVA DOMINANTE
Encinar/pinar	Formaciones arbóreas dominadas por encinares y pinares naturales y/o repoblados.	Zonas con actividad erosiva despreciable; predominio de los procesos de infiltración sobre los de escorrentía.
Matorral	Matorrales dominados por comunidades halonitrófilas (<i>Atriplex sp.</i> , <i>Artemisia herba-alba</i> , <i>Lygeum spartum</i> ...) y subesclerófilas (<i>Genista scorpius</i> , <i>Bupleurum fruticosens</i> , <i>Brachypodium ramosum</i> , <i>Rhamnus alaternus</i> , <i>Thymus vulgaris</i> ...).	Zonas de actividad erosiva ligera a moderada; predominio de procesos de arroyada superficial.
Form. Higr.	Formaciones higrófilas (<i>Populus nigra</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Tamarix gallica</i> ...).	Zonas con actividad erosiva despreciable. Existencia puntual de movimientos en masa y derrumbes.
Cultv_leñ.	Superficies dedicadas a cultivos leñosos (olivar-almendro) sin estrato herbáceo debido a los sistemas de roturación.	Zonas de actividad erosiva nula a ligera; dominio de los procesos de arroyada superficial.
Cultv_sec/vid.	Superficies dedicadas a cultivos herbáceos y viñedos sin estrato herbáceo debido a los sistemas de roturación.	Zonas de actividad erosiva nula a ligera; dominio de los procesos de arroyada superficial.
Sup. desn.	Superficies desprovistas de vegetación.	Predominio de los procesos de arroyada superficial; zonas de alta actividad morfogenética.
Sup. degrad.	Superficies intensamente degradadas.	Zonas de actividad erosiva muy severa; <i>badlands</i> .
Sup. urb.	Zonas urbanas.	Nula

En la clasificación se utilizan 3 bandas originales del Landsat ETM+ (rojo, ir-cercano e ir-medio), tres ratios artificiales (5/7, 5/4, 3/1) y el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Los canales artificiales, al mismo tiempo que enfatizan las diferencias espectrales entre materiales, minimizan el papel de la atmósfera y las variaciones radiométricas vinculadas a la topografía. El NDVI se basa en las diferencias entre los canales del rojo (r) y del infrarrojo cercano (ir-cercano) (Rouse et al., 1974), y presenta un alto grado de correlación con algunas propiedades bióticas como la biomasa vegetal, la fracción de cobertura vegetal, el índice de superficie foliar (*Leaf Area Index*) (Elmore et al., 2000), por lo que ha sido tradicionalmente utilizado en el estudio de la cubierta vegetal (Martínez et al., 2001). Por otra parte, las tres ratios señaladas son habitualmente utilizadas en el ámbito de la aplicación de la teledetección a la geología (Dury, 1987; Sabins, 1999). El cociente entre el ir-medio y el ir-cercano (5/4) se emplea para realzar las zonas con hierro, aprovechando la banda de absorción de este mineral comprendida entre los 0.85 y 0.92 μm (se corresponde aproximadamente con la banda 4) y la gran reflectividad de los minerales en la banda del ir-medio (banda 5). El cociente entre el ir-medio y el ir-lejano (5/7) realza las zonas donde existen minerales arcillosos debido a la gran absortividad de las arcillas y otros minerales hidroxilados en la banda del ir-lejano. Finalmente el cociente entre el rojo y el azul (3/1) resulta especialmente sensible a las acumulaciones de óxido de hierro. En el proceso automático de asignación se ha empleado el método de máxima verosimilitud, basado en la consideración de que los niveles digitales de una categoría se ajustan a una distribución normal, de tal modo que, a partir del vector de medias y de la matriz de varianza-covarianza es posible describir categorías mediante una función de verosimilitud.

Ya en una segunda segunda fase, la integración de las variables topográficas se ha realizado mediante un sistema de clasificación en árbol, consistente en el dise-

ño de jerarquías de reglas y de afirmaciones condicionales sobre una variable o sobre sus atributos para determinar una hipótesis.

En este caso, partiendo de la información cartográfica resultado del proceso de clasificación supervisada, se han formulado una serie de hipótesis en relación con la distribución y la intensidad de los procesos de erosión. Las dos informaciones topográficas utilizadas han sido el gradiente de pendiente (expresado en grados sexagesimales) y el grado de curvatura (valores comprendidos entre 0,5, cóncavo, y 0,5, convexo), obtenidas mediante los comandos *Curvature* y *Slope* de ARC/INFO v. 7.2.1 (figura 2).

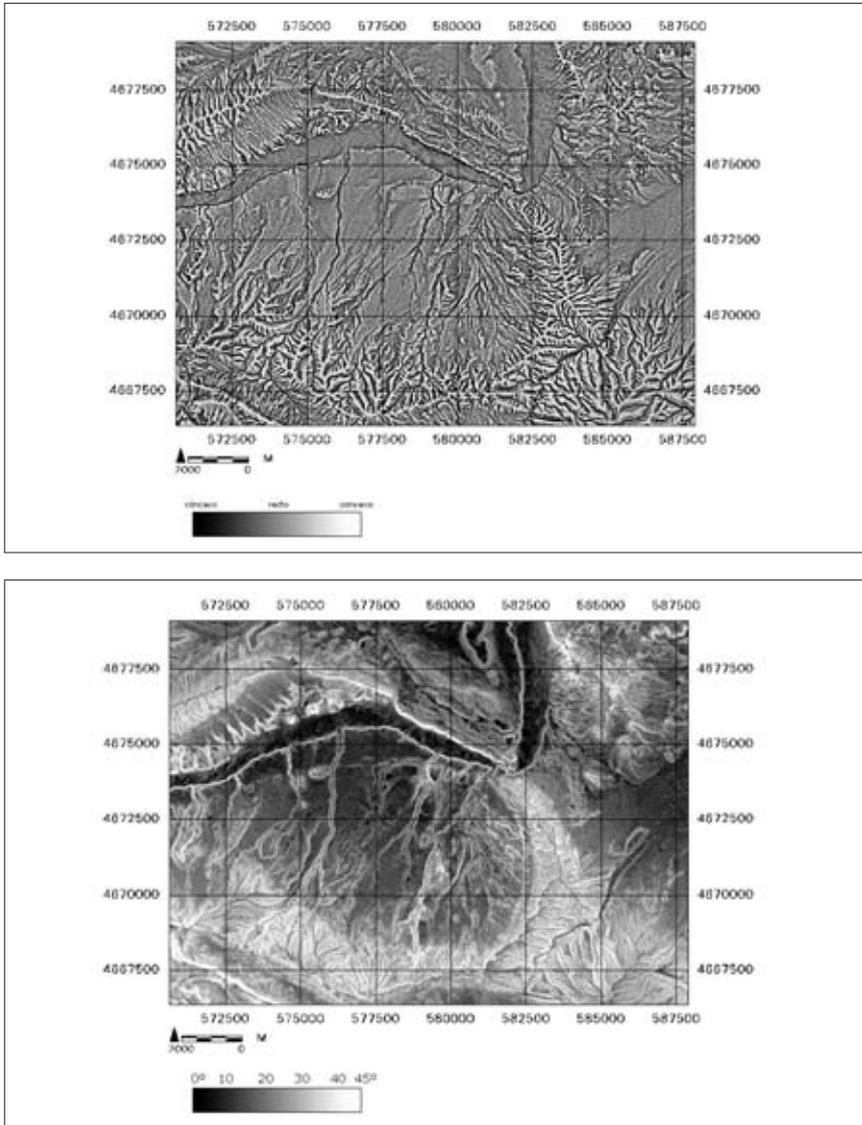


Figura 2. Variables derivadas del MDE: Morfología topográfica y Pendiente.

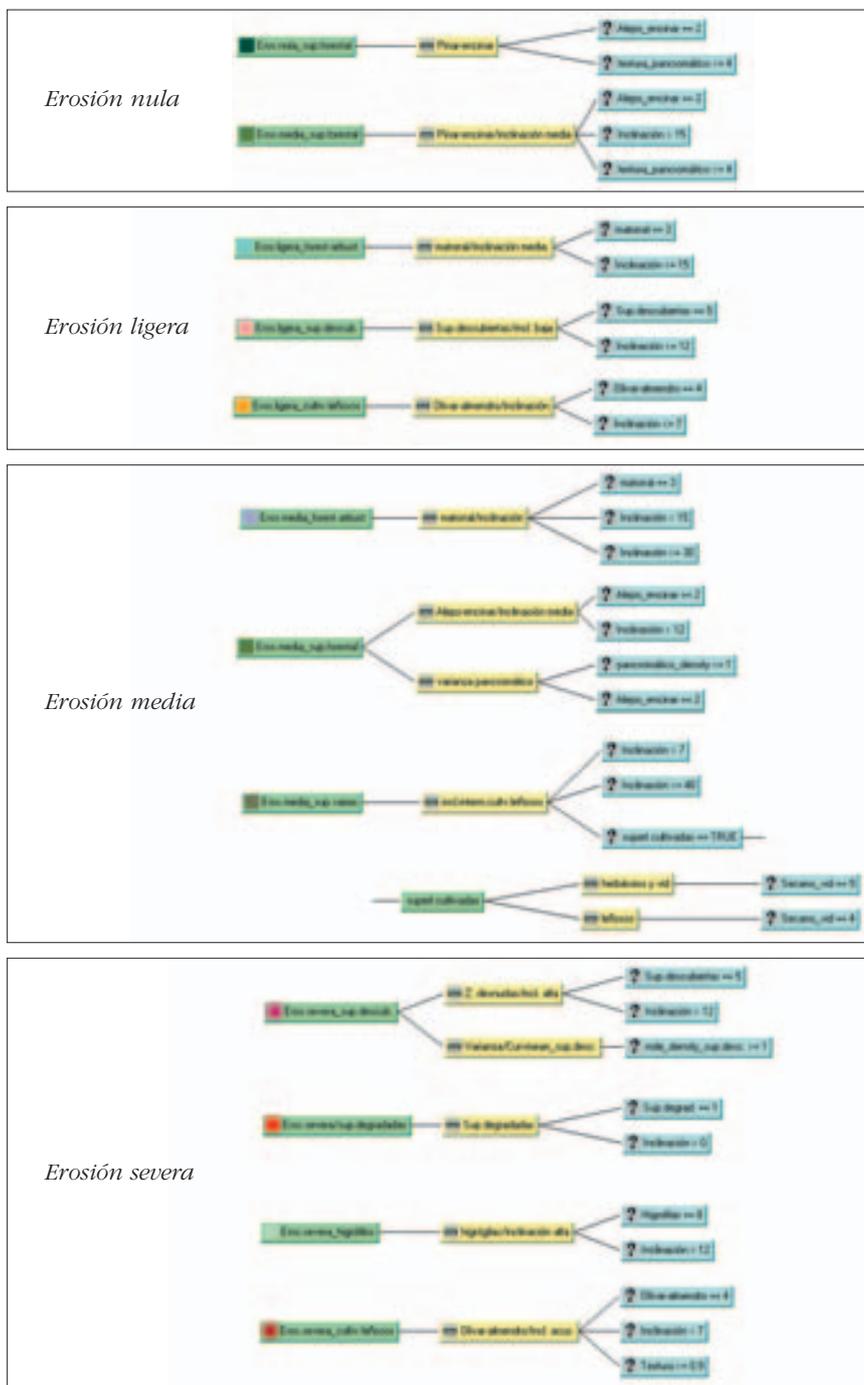


Figura 3. Hipótesis y lógica de nodos del clasificador en árbol.

La distribución de los procesos de erosión parece estar relacionada con dos factores principales: la interacción entre el tipo de cubierta y la pendiente, y la variedad espacial de la curvatura de la ladera como indicador del grado de actividad erosiva en el contexto de algunos tipos de cubierta. Para este último parámetro se ha utilizado un filtro basado en una convolución textural local para discriminar los píxeles con los niveles de variación morfo-topográfica más elevados. La utilización de una ventana móvil de 3x3 píxeles confiere a este algoritmo una componente espacial inédita en los sistemas de clasificación tradicionales píxel a píxel. Como indicador de la variabilidad se ha utilizado la varianza estadística.

La determinación de las reglas de decisión incluidas derivan de parámetros topográficos de diagnóstico para el reconocimiento de la erosión, utilizados por el Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Moreira, 1989) y de los *índices de protección de la vegetación* puestos a punto por la Sección de Hidráulica Torrencial del antiguo Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE) en 1968⁴. En la figura 3 quedan expresadas las diferentes hipótesis y la lógica de nodos incorporada en el modelo de clasificación en árbol.

La discriminación de componentes de alta frecuencia no sólo se ha aplicado a las variables derivadas del MDT, sino que también se ha utilizado en el canal pancromático aprovechando la mejor resolución espacial de esta banda, para detectar contrastes entre niveles de recubrimiento (niveles de gris) en píxeles de 15x15 m.

Las zonas en donde los procesos de infiltración son claramente dominantes sobre los de escorrentía (*erosión nula*), se vinculan a espacios arbolados y a zonas cubiertas por vegetación de carácter higrófilo localizadas, en la mayoría de los casos, en el propio cauce del Cidacos y en los fondos de las yasas instaladas en la margen derecha de este río.

Dentro de las zonas arbóreas se han discriminado con un tipo de *erosión media* aquellos sectores que presentan ángulos de inclinación superiores a 15° o que detentan una alta frecuencia en el pancromático. Esta última condición es utilizada como indicador de variaciones en el grado de cobertura de las masas arboladas. Con *erosión media* también se han discriminados los paisajes forestales arbustivos sobre pendientes acusadas (15-30°).

Las superficies con pendientes inferiores a 7° ocupadas por cultivos se incluyen dentro de las zonas con erosión ligera o nula, debido a que las propias prácticas agrarias impiden el desarrollo de procesos erosivos, en general poco problemáticos como consecuencia de la baja inclinación. Las zonas desnudas con pendientes superiores a los 12° y alta frecuencia morfo-topográfica, y las zonas fuertemente degradadas representan los sectores más proclives a la actividad erosiva.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En lo que respecta a la cartografía de los tipos de cubierta, según la matriz de contingencia (tabla 4), -indicador del grado de pureza de las áreas de entrena-

4. Estos índices consideran los conceptos de pendiente crítica de inicio de la erosión y de pendiente crítica de arrastre total, que ligan las influencias del relieve y la erosionabilidad del suelo al efecto protector de la vegetación. Los umbrales de pendientes que establecieron a partir de ensayos de laboratorio son de 12% y 18% para el inicio y el arrastre total, respectivamente.

TABLA 4. MATRIZ DE CONTINGENCIA

	Sup. degrad.	Encinar/pinar	Matorral	Cultv_leñ	Sup. desn.	Cultv_sec/vid	Sup. urb.	Form. Higr.
Sup. degrad.	95.95					1.35		
Encinar/pinar		98.31	0.39					
Matorral	2.03		96.51	2.78		1.16		1.72
Cultv_leñ	0.68		1.94	91.02	2.33	2.78	1.77	1.15
Sup. desn.				2.91	90.7	6.98		
Cultv_sec/vid	1.35		1.16	2.78	6.98	85.08	2.65	3.45
Sup. urb.				0.51		2.65	95.58	
Form. Higr.		1.69						93.68

miento, la mayor parte de las clases contempladas presentan porcentajes superiores al 95%. Tan sólo en el caso de los cultivos leñosos, la superficie descubierta de vegetación y la vegetación higrófila encontramos porcentajes por debajo del 95% aunque, en ningún caso inferiores al 85%.

Las superficies dominadas por el encinar-pinar y las formaciones higrófilas presentan valores de NDVI elevados (media = 0.42), debido a la alta correlación de éstos con la biomasa y los niveles del área foliar, lo que contribuye positivamente a su discriminación respecto de las zonas de matorral y, evidentemente, respecto de las zonas con escaso recubrimiento vegetal (zonas cultivadas, sectores degradados,...). Por su parte, en los cocientes minerales aplicados se computan valores muy similares entre sí, siendo, en cualquier caso, relativamente inferiores a los registrados en el resto de las cubiertas (70-80). La respuesta de las superficies de matorral disiente en algunas bandas con las dos anteriores: el NDVI es muy inferior y la igualdad entre los valores de las ratios minerales se rompe a favor del cociente entre el ir-medio y el ir-cercano -discriminante de minerales ferrosos- como consecuencia de la mayor reflectividad del suelo en el ir-medio.

La composición química, la textura, la estructura y el contenido de humedad del suelo son los principales factores definidores de la diferente reflectividad de las zonas con escaso recubrimiento vegetal (superficies degradadas y desnudas) o que se encuentran cultivadas. Las zonas fuertemente degradadas destacan por la baja reflectividad en el ir-cercano (60) y el bajo valor del NDVI. Al mismo tiempo, tanto en las bandas del ir-medio, como en la banda del rojo los valores se disparan debido al bajo nivel de humedad y a la alta reflectividad en este segmento del visible, como consecuencia del alto contenido en óxido de hierro de los suelos arcillosos (dominantes en el sector nororiental de la zona de estudio) y el bajo contenido en materia orgánica. Las zonas totalmente desprovistas de vegetación presentan una respuesta espectral similar a la de las zonas fuertemente degradadas pero siempre mostrando valores de reflectividad más elevados en las bandas originales. Sin embargo, en las ratios minerales, tanto en las zonas degradadas como en las desprovistas de vegetación, se registran valores muy similares, siendo bajos en la ratio 5/7, medios en la ratio 5/4, y altos en el cociente entre los canales del visible (3/1). En la figura 4 se presentan los valores medios ($\pm 1\sigma$) de las distintas cubiertas contempladas en el ir-cercano, NDVI y la ratio entre las bandas del rojo y el azul.

Partiendo de esta base, la estimación cuantitativa de la separabilidad espectral entre clases mediante los análisis de divergencia transformada y la distancia de Jeffries-Matusita resulta satisfactoria. En la mayor parte de los casos la separabilidad espectral es muy elevada (valor medio de la distancia de Jeffries-Matusita, 1401.61).

Sin embargo se observan algunos pares que detentan cierto grado de confusión. Utilizando la distancia Jeffries-Maatusita, las más reseñables se vinculan a las superficies de cultivos de secano y vid, presentando valores de 1308 con el suelo desnudo, 1330 con los cultivos leñosos y 1375 con las zonas fuertemente degradadas. Otro foco de confusión, aunque de menor magnitud, lo encontramos también entre las superficies ocupadas por cultivos leñosos (olivar-almendro) y las superficies desnudas (1379). En cualquier caso, se trata de valores no excesivamente elevados.

Una vez aplicado el clasificador de máxima verosimilitud en la fase de asignación, los resultados finales se pueden apreciar en la figura 5, en donde destaca especialmente la estrecha relación que existe entre algunos tipos de cubierta y la distribución de las unidades principales morfo-estructurales del área de estudio. De este modo, las formaciones arbustivas y las masas de encinar/pinar (verdes oscuros) se distribuyen por toda la orla montañosa conglomerática. Los cultivos leñosos se encuentran predominantemente en los sistemas de glacis que jalonan el valle del

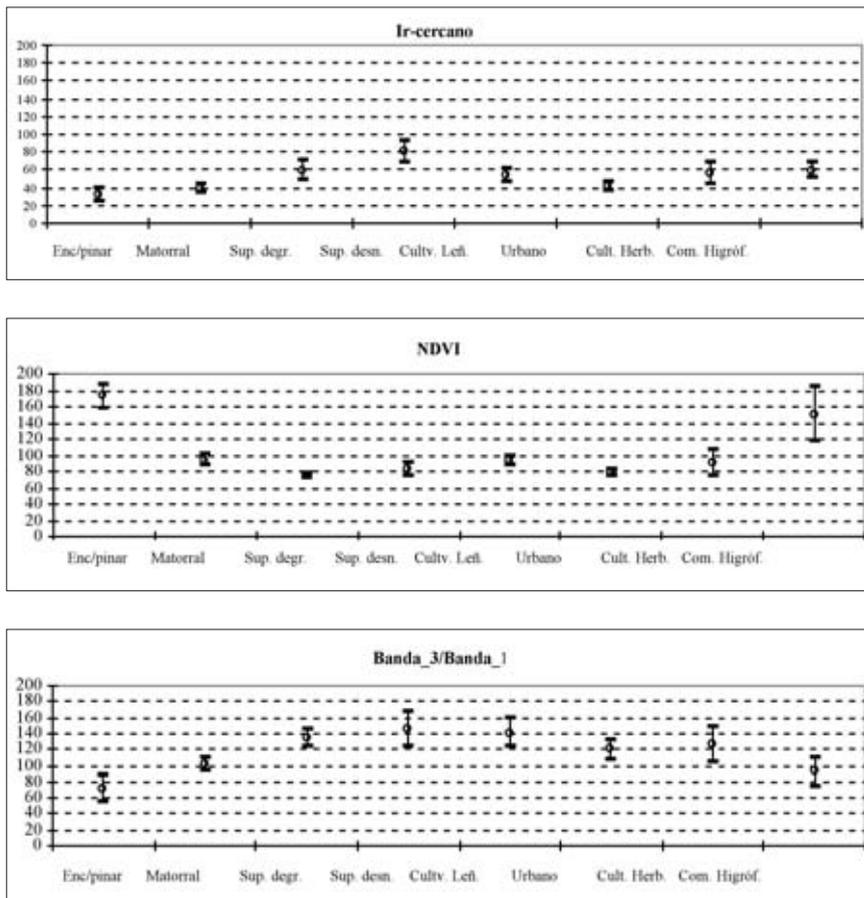


Figura 4. Tipos de cubierta en el ir-cercano el NDVI y el cociente 3/1: Media \pm 1 σ .

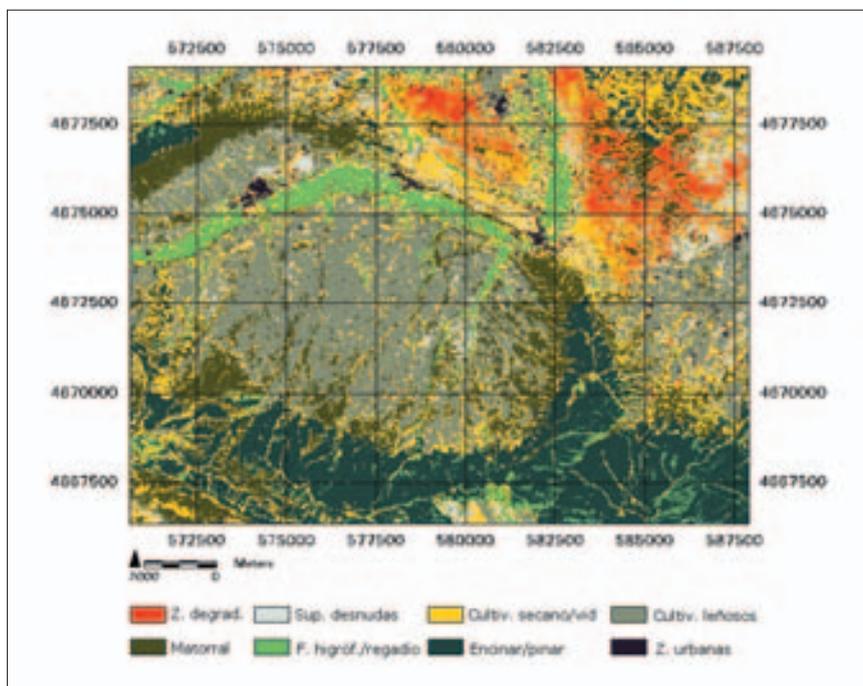


Figura 5. Resultados cartográficos del proceso de clasificación digital supervisado.

Cidacos, especialmente en su margen derecha, mientras que los cultivos herbáceos presentan un modelo de distribución mucho más heterogéneo. Las zonas degradadas se distribuyen puntualmente por toda el área de estudio, aunque son dominantes en los sistemas de glaciares de la Depresión de Tudelilla, en el dominio de las formaciones evaporíticas al Norte de Autol y en la cara meridional de interfluvio que separa los Llanos de Aldeanueva de la cuenca baja del Cidacos.

El refinamiento de la regionalización de los niveles de erosión mediante la inclusión de las variables topográficas y el canal pancromático, a través de las reglas recogidas en la figura 3, contribuye positivamente a la discriminación de los distintos tipos de actividad erosiva, especialmente en las superficies cultivadas y con escasa vegetación. Según la matriz de confusión realizada, método más utilizado para conocer los porcentajes de píxeles clasificados correctamente (Chuvieco, 2002), la bondad de la clasificación se sitúa en torno al 75% ($Kappa = 0.73$). Teniendo en cuenta las limitaciones de interpretación que conlleva este extremo, se puede apuntar que el 8% de la zona de estudio presenta problemas severos de erosión (tabla 5 y figura 6), y que aproximadamente el 65% de la superficie se encuentra sometido a un grado de erosión de nulo a muy ligero. El resto de la superficie participa de una dinámica erosiva de tipo medio.

Las zonas de mayor actividad erosiva se sitúan fuera de la unidad morfoestructural de la Hoya de Arnedo; destacan sobremanera los afloramientos yesíferos que se extienden al norte de la localidad de Autol y las laderas empinadas y los siste-

TABLA 5. SUPERFICIE DE LOS PAISAJES EROSIVOS RESULTANTES.

GRADO DE EROSIÓN	SUPERFICIE (HA)	PORCENTAJE
Eros.severa/sup.degradadas	1027.8	4.654
Eros.severa/cultiv.leñosos	89.28	0.404
Eros.severa/higrófilos	575.82	2.607
Eros.severa/sup.descub.	129.78	0.588
Eros.media/forest.arbust.	1327.95	6.013
Eros.media/sup.forestal	277.83	1.258
Eros.media/sup.varias	4468.59	20.235
Eros.ligera/cultiv.leñosos	3947.85	17.877
Eros.ligera/forest.arbust.	1718.37	7.781
Eros.ligera/sup.descub.	755.91	3.423
Eros.nula	340.74	1.543
Eros.nula/cultiv.sec/vid	2363.22	10.701
Eros.nula/higrófilos	1195.74	5.415
Eros.nula/sup.forestal	3676.14	16.646
Indefinido	188.82	0.855
<i>Totales</i>	22083.84	100.000

mas de glaciares asociados de las fachadas suroccidental y suroriental de los Agudos, donde se encuentra el 4.65% de la superficie fuertemente degradada por la erosión (figura 7). En relación con Los Agudos, García-Ruiz (1994), en su ensayo de síntesis de los paisajes degradados de La Rioja, presenta este enclave como uno de los exponentes de *las áreas afectadas por erosión muy severa*. Entre los factores que argumentan esta afirmación, García-Ruiz destaca la presencia de arcillas expansivas y sales, y la acusada aridez de esta zona.

Otras zonas fuertemente castigadas por la erosión son algunos segmentos escarpados de los barrancos semipermanentes, y algunos sectores desprovistos de vegetación de las serranías conglomeráticas meridionales. En el primer caso, los movimientos de gravedad (derrumbes y descalces basales)- son los procesos geomorfológicos dominantes. En el segundo se ha observado una cierta sobreestimación de la actividad erosiva como consecuencia de la confusión espectral entre los cultivos herbáceos y las zonas de escasa vegetación, coincidiendo en este caso con infraestructuras forestales (pistas, cortafuegos, etc.).

Las zonas con fuerte inclinación y alta frecuencia morfo-topográfica, totalmente desprovistas de vegetación, también poseen un grado de erosión severo. En este sentido destacan por la espectacularidad de los sistemas de cárcavas y regueros los escarpes de la circunvalación de Arnedo y los desmontes relacionados con el polígono industrial "El Reposal", ubicado al Oeste de la misma localidad.

En un lado opuesto, las zonas donde la actividad erosiva presenta niveles inapreciables se corresponden con los paisajes forestales del sector meridional del área de estudio (los pinares y encinares de las sierras conglomeráticas de Yerga y Valdelavía), las zonas colonizadas por las comunidades ribereñas y las zonas cultivadas de la margen derecha del río Cidacos. Mientras que en los dos primeros casos (paisajes forestales y ribereños) la vegetación natural se encarga de equilibrar los

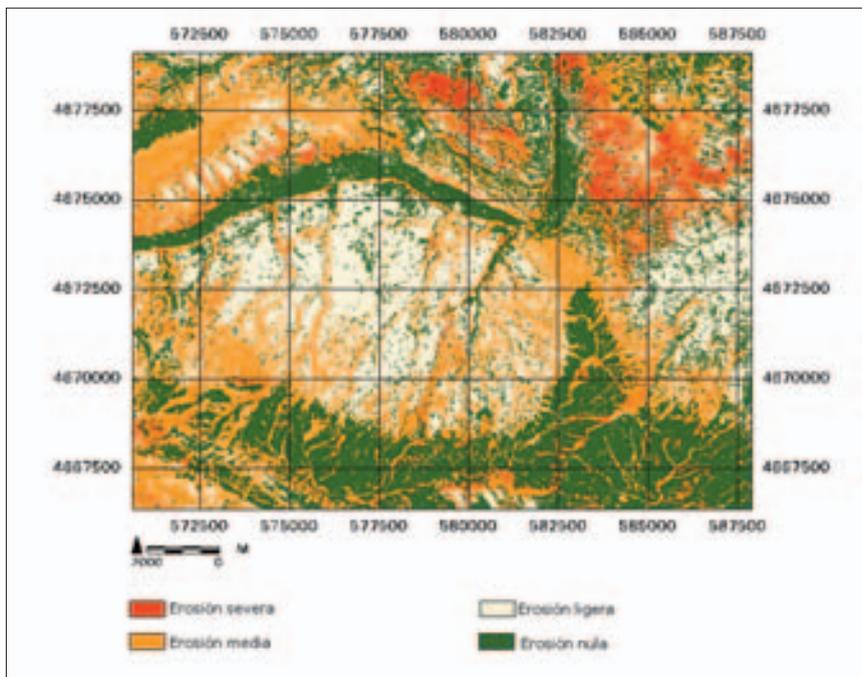


Figura 6. Espacialización de la actividad erosiva.



Figura 7. Superficies degradadas en la base de los Agudos (Erosión severa).

procesos de escorrentía e infiltración, en las zonas cultivadas la propia actividad agrícola mecanizada (labores, nivelaciones...) y la capacidad de drenaje de las formaciones detríticas groseras, son responsables en buena medida de la escasez de procesos severos de erosión.

5. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista metodológico se puede concluir que la utilización de información espectral para la detección de procesos de erosión ofrece resultados satisfactorios cuando, como en este caso, se opera a escala regional en el contexto de los clasificadores supervisados. El establecimiento previo de una cartografía de tipos de cubierta ha jugado un papel esencial al permitirnos, tal y como apunta Lobo (1997), la introducción del componente discontinuo de la naturaleza y la base de la estratificación geográfica de la actividad erosiva. La utilización de ortofotografías a escala 1:5.000 favorece la identificación y precisión de las áreas de entrenamiento, lo que a su vez redundará en la bondad de los resultados finales. Sin embargo, la utilización de sensores con mayor resolución espacial y espectral podría mejorar notablemente la precisión de la cartografía resultante, al tiempo que se subsanarían problemas de discriminación entre cubiertas de similar comportamiento espectral.

En cuanto a la utilización de criterios no estrictamente espectrales, el aislamiento de los componentes morfo-topográficos de alta frecuencia, a partir de la integración de información topográfica, favorece la discriminación del grado de erosión especialmente en las cubiertas de mayor confusión espectral. Se ha comprobado que, en muchas ocasiones, la alta variabilidad microtopográfica es expresión directa de dinámicas geomorfológicas severas. Por tanto, la mayor resolución espacial del MDT y la consideración de las relaciones espaciales de los píxeles, han sido empleados satisfactoriamente como medios para discriminar estos sectores. El caso más significativo se sitúa en las paredes de las yasas de la margen derecha del Cidacos, en donde se localizan una serie de sectores afectados por movimientos en masa y procesos de erosión remontante muy activos.

Desde el punto de vista temático se puede concluir que, a pesar de la existencia de un notable porcentaje de superficie que no presenta signos aparentes de erosión, se han identificado una serie de sectores (aprox. el 8% de la superficie considerada) en donde los procesos erosivos se manifiesta de manera muy evidente, siendo muy acusada la presencia de barrancos, surcos... Se trata de zonas localizadas en los márgenes de algunas de las yasas laterales del río Cidacos, en determinadas secciones donde la actividad antrópica ha fomentado la reactivación de los procesos morfogenéticos (taludes, desmontes, etc.) y, muy especialmente, en las caras meridionales de los Agudos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto REN2002-00133, Plan Nacional de I+D+I (2002-2003); Dirección General de Investigación (Ministerio de Ciencia y Tecnología). Los autores expresan su agradecimiento al Departamento de Geografía de la Universidad de La Rioja por la colaboración prestada.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Chuvieco, E. 2002. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia. Madrid. 586 pp.
- Del Barrio, G. y Boer, M. 1996. Una aproximación jerárquica a la cartografía del espesor del suelo en ambientes semiáridos. Granda, A. y Pagés Valcarlos, J. Eds.: *Actas de la IV Reunión de Geomorfoogía*. Cadernos do Laboratorio Xeilóxico de Laxe (21), 177-191. Ocastro (A Coruña).
- Dury, S.A. 1987. *Image Interpretation in Geology*. Chapman & Hall. London.
- Elmore, A.; Mustard, J.; Manning, S.; Lobell, D. 2000. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment* (73), 87-102.
- Friedl, M.A. y Brodley, C.E. 1997. Decision tree clasification of land cover from remotely sensed data". *Remote sensing of Environmet* (61), 399-409.
- García-Ruiz, J.M.; Arnáez, J.; Terreo, E.; Valle, J.; Ortigosa, L.M. 1996. Identificación de factores de control de la actividad geomorfológica en Montaña media: aplicación de técnicas SIG en Cameros Viejo, La Rioja. *Zubía Monográfico*, (8) 43-60.
- García-Ruiz, J.M. 1994. Los paisajes naturales y los paisajes degradados: un ensayo de síntesis. En García-Ruiz, J.M. y Arnáez, J. (Coor.). *Geografía de La Rioja. Geografía Física*. Vol 1. Fundación Caja Rioja. Logroño. 251-265.
- Gobierno de La Rioja, Consejería de Turismo y Medio Ambiente, 2001. Plan Estratégico de Conservación del Medio Natural de La Rioja.
- Gonzalo-Moreno, A. 1981. *El relieve de La Rioja. Análisis de geomorfología estructural*. Biblioteca de Estudios Riojanos. Instituto de Estudios Riojanos. Logroño. 508 pp.
- Jensen, J. 1996. *Introduction Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Englewood Cliffs. New Jersey.
- De Jong, S.M.; Paracchini, M.L.; Bertolo, F.; Folving, S.; Meiger, J.; De Roo, A.P.J. 1999. Regional assessment of soil erosion using the distributes model SEMMED and remotely sensed data. *Catena* (37), 291-308.
- King, C. y Delpont, G. 1993. Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. *Remote sensing Rev.* (7), 223-232.
- Lobo, A. 1997. Series temporales de imágenes satelitales en la observación y análisis de la cobertura vegetal de la Península Ibérica. En Ibáñez, J.J.; Valero, B.L.; Machado, C. (eds.). *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Geofoma Ediciones. Logroño. 187-202.
- M.A.P.A. 1982. Paisajes erosivos en el Sureste Español. Ensayo de Metodología para el estudio de sus cualificación y cuantificación. Proyecto Lucdeme. Monografías, 26. Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 67 pp.
- Martínez, B.; Gilabert, M.A.; Del barrio, G.; Meliá, J. 2001. Desarrollo de una metodología de detección de cambios en zonas susceptibles de procesos de degradación. En Rosell, J y Martínez-Casanovas, J. *Teledetección. Medio Ambiente y Cambio Global*, pp. 110-113. Universitat de Lleida i Editorial Milenio. Lleida.

- Metternich, G.I.; Fermont, A. 1998. Estimating Erosion Surface Features by Linear Mixture Modeling. *Remote sensing of Environment*, 64: 254-265.
- Metternich, G.I.; Zinck, A. 1998. Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (53), 143-153.
- Meyer, L.D. y Wischmeier, W. H. 1969. Mathematical Simulation of the Process of Soil erosion by Water. *Am Soc. Agric. Eng. Trans.*, 12 (6), 754-758.
- Moreira, J.M. 1989. *La erosión y el uso del suelo en Andalucía. Su evaluación a través de un sistema de Información Geográfica*. Jornadas Técnicas sobre: El Agua y el Suelo. Laboreo de Conservación. Consejería de Agricultura. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Moreira, J. M. 1991. *Capacidad de uso y erosión de suelos. Una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía*. Junta de Andalucía Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Agencia de Medio Ambiente. 446 pp.
- Morgan, R.P.C. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 343 pp.
- Pérez, F. y De la Riva, J. 1998. Integración de la vegetación en un modelo regional de erosión tras el fuego en el Prepirineo occidental oscense, *Cuadernos de Investigación Geográfica* (24), 59-68.
- Perles, M.J. 1997. *Medir la erosión: fragilidad erosiva en el valle del río Vélez*. Servicio de Publicaciones de la Diputación provincial de Málaga. Malaga. 230 pp.
- Puigdefábregas, J. 1996. El papel de la vegetación en la conservación del suelo en ambientes semiáridos. En Lasanta, T. y García-Ruiz, J.M.: *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*, pp. 79-87. Instituto de estudios Riojanos. SEG. Logroño.
- Rivas-Martínez, S.; Gandullo, J.M.; Allué, A.; Montero de Burgos, J.L.; González-Rebollar, J.L. 1987. *Memoria del Mapa de Series de vegetación de España*. Mº de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A. Deering, D.W.; Harlan, J.C. 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. NASA/GSFC. Type III. Final Report. Greenbelt. MD. 371 pp.
- Sabins, F.F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* (14), 157-183.
- Salvador, R. 1999. A Parametric Model for Estimating Relations Between Unprecisely Locates Field Measurements and Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* (67), 99-107.
- Swain, P. H.; Davis, S.M. (Eds.) 1978. *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. McGraw-Hill, New York.
- Thomas, I.L.; Ching, N.P.; Benning, V.M.; D'Aguanno, J.A. 1987. A review of multi-channel indices of class separability, *Internatinal Journal of Remote Sensing*, (8), 331-350.

