

Usos del suelo y riesgo de erosión en la Sierra de la Contraviesa a partir de imágenes de satélite

M. T. Camacho Olmedo

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Facultad de Filosofía y Letras. Campus de Car-tuja s/n. 18071 Granada.

RESUMEN

La teledetección se ha erigido como una de las técnicas más apropiadas para la aproximación a los paisajes y, en particular, para la cartografía de uno de sus componentes fisionómicos: la ocupación del suelo. En un área de la Alpujarra Baja, dos imágenes del satélite SPOT son sometidas a un proceso de interpretación visual y tratamientos digitales destinados a la obtención de una cartografía de los usos del suelo. Tras la creación de un Modelo Digital del Terreno, la imagen clasificada es combinada con la imagen de pendientes, así como con cartografías previas, con el objetivo de delimitar unidades homogéneas en función del riesgo de erosión, como factor determinante del paisaje de la zona de estudio.

PALABRAS CLAVE: Teledetección, usos del suelo, riesgo erosivo, Alpujarra Baja.

ABSTRACT

Remote sensing is considered like one of the best procedure for approaching to the landscape and specially to map one of its fisionomic compounds: the land use. Two SPOT images of Alpujarra Baja area where undergone to visual interpretation process and digital treatment to get a land use cartography. We perform a Digital Elevation Model, and then we mixed the classified picture with slope image and with other previous cartographies in order to get a homogeneous unity according to erosion risk like determinant factor of our study area.

KEY WORDS: Remote sensing, land use, erosion risk, Alpujarra Baja.

INTRODUCCIÓN

El área analizada se sitúa al Sur de Sierra Nevada, en la denominada Alpujarra Baja. La Sierra de la Contraviesa se erige como un gran macizo esquistito de lomas erosionadas a altitudes comprendidas entre 1000 y 1300 metros, formando un eje homogéneo de cumbres con sentido Oeste-Este. Del mismo, parten una multitud de barrancos organizados en una red hidrográfica muy encajada que debe descender en la solana hasta la línea de costa.

Sobre estas laderas de fuertes pendientes, el al-mendro ha configurado un paisaje agrícola característico de la Sierra. La viña, que en otros tiempos se extendía hasta la costa, hoy día se circunscribe a la zona de cumbres, aún cuando persisten parcelas aisladas a baja altitud. En oposición al secano, en las vegas y deltas costeros la agricultura de cultivos forzados se ha impuesto sobre las parcelas tradicionales de regadío. En la última década asistimos a un proceso continuo de desmantelamiento de las laderas bajas (por debajo de los 400 m) para la implantación de invernaderos.

La confluencia de un relieve accidentado, un sustrato fácilmente erosionable y una ocupación

antrópica adversa determinan un riesgo de erosión elevado en el conjunto del macizo, aunque las condiciones particulares pueden matizar esta situación general.

Por ello, nos planteamos realizar un estudio de segmentación de una zona de la Sierra en función del riesgo erosivo potencial, teniendo en cuenta los parámetros que ejercen una mayor influencia en los procesos erosivos: usos del suelo y cobertura vegetal, litología, tipo de suelo y pendientes. En síntesis, hemos atendido a dos objetivos prioritarios: cartografiar los usos del suelo y delimitar zonas homogéneas según el riesgo de erosión.

FUENTES Y METODOLOGÍA

Como fuente básica de información de han elegido dos imágenes multiespectrales del satélite SPOT1, de fechas diferentes a lo largo del año para poder abordar un estudio multitemporal y fenológico o como ayuda al proceso de clasificación. En concreto se han adquirido las escenas K37-J276 del 15 de junio de 1987 y del 21 de octubre de 1988, en modo multiespectral (canales XS1, XS2 y XS3), con una resolución espacial de 20 metros y corregidas en un nivel 1B. Las escenas cubren un

área de 60 por 60 km. Las imágenes han sido adquiridas bajo forma numérica (bandas CCT) y fotográfica. En este último caso se trata de reproducciones sobre papel de las diapositivas de origen de la imagen, tanto a escala 1:400000 como a escala 1:50000. La película original proviene de un aparato de restitución a láser (VIZIR COLOR) de alta resolución. A partir de las bandas ha sido elegida una imagen de trabajo de 499 líneas y 793 columnas (9'980 por 15'86 km.), atendiendo a la representatividad del área en el conjunto de la Sierra de la Contraviesa así como a la diversidad de usos del suelo (Figura 1). Como documentación complementaria se han utilizado fotografías aéreas verticales a escala 1:18000, así como toda la cartografía temática y topográfico disponible sobre la zona.

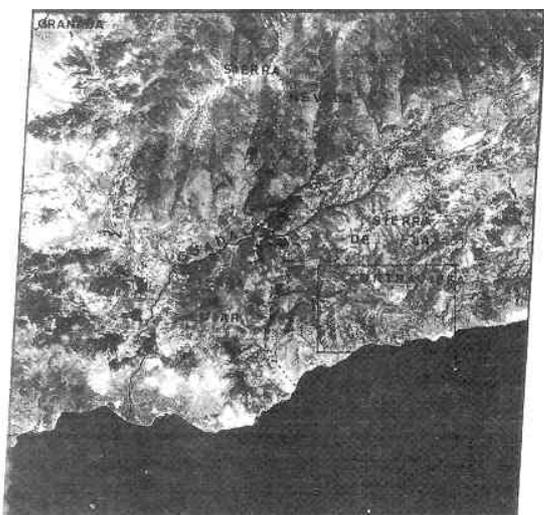


Fig. 1. Localización del área de trabajo en la imagen del satélite SPOT 1 (15 de junio de 1987)

La metodología empleada en este trabajo ha estado condicionada por uno de los problemas más generalizados en las imágenes que corresponden a zonas de montaña. Nos referimos a la variación de la respuesta radiométrica en función del relieve y la presencia de sombras, circunstancia que obstaculiza el proceso de identificación de usos del suelo. Este hecho es particularmente importante en la imagen de octubre, fecha en que la inclinación de los rayos solares a esta latitud es mayor. Teniendo en cuenta nuestros objetivos (la clasificación de la imagen según los usos del suelo y la delimitación de zonas según el riesgo erosivo) y ante la imposibilidad de obtener una imagen clasificada fiable debido a la fuerte presencia de sombras, se ha aplicado un modelo de corrección radiométrica. Este modelo modifica la respuesta "falsa" y restablece la respuesta que ese tipo de ocupación de suelo tendría en una zona llana. La corrección se realiza a partir de un Modelo Digital del Terreno, teniendo en cuenta las actitudes, las pendientes y la orientación. De esta forma hemos procedido a crear el MDT, subsanando la falta de

datos topográficos digitales para obtener la imagen de pendientes.

A partir de las imágenes corregidas, la extracción de la información se ha basado en la interrelación del proceso de interpretación visual y los tratamientos digitales con el objetivo de delimitar los tipos de ocupación del suelo. El Modelo Digital del Terreno ha sido explotado sobre todo en función de la imagen de pendientes. Los resultados obtenidos, junto la información extraída de la documentación complementaria y del trabajo de campo, nos han permitido finalmente proponer una zonificación según el riesgo de erosión.

Ha sido utilizado el programa de tratamiento de imágenes DIDACTIM para la mayor parte de los tratamientos, aunque para las correcciones geométricas se ha empleado el programa MULTISCOPE, más operacional en este punto, y el programa "Digitizing Tablet Kit" para la digitalización de los puntos de control. Por su parte el programa ERDAS nos ha permitido clasificar automáticamente las imágenes y recuperar el Modelo Digital del Terreno.

CREACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO Y CORRECCIONES DE LAS IMÁGENES XS

Creación de un modelo digital del terreno

Conicionados por el marco de trabajo, se ha elegido el método de la digitalización e interpolación para la creación de la imagen ráster de actitudes o Modelo Digital del Terreno (MDT). Para ello hemos utilizado el Sistema de Información Geográfica ARC/INFO, tanto la versión para PC como para Estaciones de trabajo.

A partir de los mapas topográficos a escala 1:25000 del Instituto Geográfico Nacional hemos digitalizado las curvas de nivel con una equidistancia de 50 metros, aunque se han añadido isohipsas de 10 en 10 metros en las zonas de pendiente muy suave para regularizar espacialmente la presencia de curvas de referencia. Como información complementaria se ha digitalizado un conjunto de 200 puntos correspondientes a cimas y pequeños rellanos, repartidos regularmente.

Para la interpolación de las actitudes y posterior obtención de la imagen raster, se ha utilizado la versión de ARC/INFO para Estación SUN. La interfaz de ARC/INFO con el programa de tratamiento de imágenes ERDAS permite la obtención de la imagen (Figura 2). A partir de la imagen de actitudes hemos obtenido imágenes derivadas de primer grado, en concreto la imagen de pendientes y la imagen de orientaciones o azimut (Figura 3).



Fig. 2. Modelo Digital del Terreno

Corrección geométrica

Las imágenes SPOT XS de origen habían sido corregidas en un nivel 1B. Este nivel incluye correcciones radiométricas (correcciones para igualar los detectores) y correcciones geométricas, aunque no de tipo bidimensional. Por ello, para obtener una precisión cartográfica, ha sido necesario corregir su geometría, transformándolas en imágenes de nivel 2.

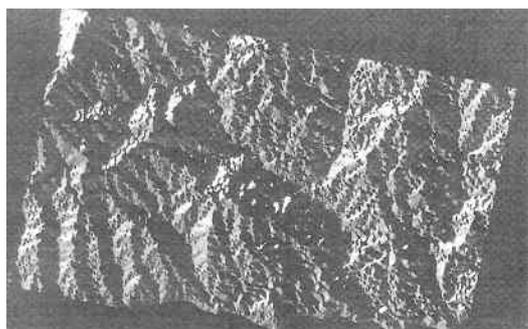


Fig. 3. Imagen de orientaciones

Las dos escenas han sido tomadas por el sensor del satélite SPOT bajo un ángulo casi vertical (la imagen del 21-10-88 con una incidencia de $R2\$4$ y la imagen del 15-06-87 con una incidencia de $R2\$2$), característica que atenúa los efectos del relieve. A pesar de que este ángulo aumenta hacia los vértices de las escenas, donde se localizan las imágenes de estudio, la superposición entre ellas ha sido posible, lo que ha facilitado el proceso de corrección geométrica.

En primer lugar se han digitalizado sobre el mapa topográfico un total de 14 puntos. La localización de los puntos de control en la imagen ha sido realizada únicamente para una fecha. Dadas las características del área estudiada (relieve accidentado, parcelario difuminado, ausencia de una red viaria.), esta fase no ha estado exenta de dificultades para la obtención de un conjunto de puntos distribuidos uniformemente y de fácil reconocimiento. De esta manera se han creado los dos ficheros de puntos necesarios para la corrección.

La corrección geométrica aplicada ha utilizado una ecuación de ajuste de grado 1, según el cálculo de la ley de transformación polinomial. A pesar de que el grado 2 o 3 es más adecuado para una zona accidentada, su aplicación provocaba importantes deformaciones en las imágenes. Posteriormente, para calcular las respuestas radiométricas de los píxeles de la imagen resultante, hemos utilizado el modelo de convolución cúbica puesto que este modelo procura conservar la radiometría de origen. Para la obtención de las imágenes hemos elegido como imagen de referencia el Modelo Digital del Terreno. El resultado es pues una imagen corregida geoméricamente y con las dimensiones del MDT (556 líneas y 920 columnas), lo que permite su superposición.

Corrección radiométrica

Se ha aplicado un modelo de corrección radiométrica de los efectos topográficos, desarrollado por C.J. Yang (1990). Según sea el estado de la atmósfera será necesario corregir uno o varios de estos efectos, en concreto las sombras, el ángulo de incidencia del sol, la altitud, la iluminación difusa, las variaciones medioambientales, o el efecto de la reflectividad bidireccional. Sobre las imágenes de trabajo se ha utilizado el modelo de corrección de los efectos de sombras, del ángulo de incidencia del sol y de la iluminación difusa. La fórmula aplicada transforma el nivel digital bruto en un nivel digital corregido, correspondiente a la radiancia de un elemento horizontal de pendiente nula, de ángulo de incidencia del sol igual al ángulo zenital, y con una radiancia únicamente directa.

La corrección ha sido efectuada sobre las imágenes de junio y de octubre de manera independiente, es decir, no se han igualado las condiciones de iluminación de una fecha con respecto a la otra. La presencia de sombras, principal obstáculo para el tratamiento de las imágenes brutas, se ha atenuado considerablemente. Este hecho es más evidente en la imagen de octubre, donde las sombras alcanzan un mayor desarrollo.

INTERPRETACIÓN VISUAL Y TRATAMIENTOS DIGITALES

Interpretación visual

La fase de identificación e interpretación analógica ha sido realizada a partir de las reproducciones fotográficas sobre papel de la escena SPOT a escala 1:50000. Se trata de una composición en falso color clásica a partir de los datos digitales de los canales XS1 (azul), XS2 (verde) y XS3 (rojo), a los que se ha aplicado una adaptación de la dinámica, automática o lineal, lo que provoca una imagen más contrastada.

De esta manera se ha procedido a discriminar la información, identificar las diferentes unidades de ocupación del suelo e interpretar su distribución espacial. Este proceso ha sido realizado en su mayor parte a partir de la imagen de junio, puesto que la diversidad de respuestas es más importante, pero se han incluido modificaciones en función de la imagen de octubre, más válida para el reconocimiento de ciertas unidades. Los criterios utilizados para la identificación de las unidades han sido el color, la forma, el tamaño y la textura. Estos criterios no se aplican siempre fácilmente, teniendo en cuenta el débil contraste entre las parcelas y la diversidad de la superficie que sustenta la agricultura de la zona. Esta fase de interpretación visual ha permitido una primera aproximación a la leyenda de unidades de ocupación del suelo.

Tratamientos digitales

Clasificación automática

Como paso previo a la clasificación supervisada, hemos aplicado una clasificación automática de tipo no jerárquica y basada en el método de las nubes dinámicas. El resultado es más un documento de base para realizar una clasificación supervisada que una clasificación en sentido estricto.

La imagen de octubre es útil para la distinción de ciertas unidades que aparecen como clases independientes: la horticultura y los árboles frutales de regadío, la vegetación arbórea de los barrancos, el matorral sobre calizas y, finalmente, el suelo desnudo de fuerte reflectividad y las zonas urbanas. La imagen de junio distingue con más dificultad ciertas unidades como la horticultura, pero resalta las unidades caracterizadas por el sustrato geológico. Es el caso del grupo de suelos desnudos sobre calizas, esquistos o filitas. La vegetación está también presente, a pesar de la mezcla entre el bosque de alcornoques y encinas, y el matorral. Respecto a la arboricultura y a la viña, estos documentos no ofrecen resultados satisfactorios.

Como conclusiones parciales podemos decir que los resultados de las clasificaciones automáticas no añaden clases nuevas a aquella, que habíamos definido en la fase de interpretación visual y reafirman la complejidad de las unidades de arboricultura y viñas, próximas en sus respuestas tanto de los suelos desnudos como del matorral.

Proceso de realce de las imágenes y creación de bandas artificiales

Esta etapa ha tenido como objetivo mejorar visualmente las imágenes corregidas a partir de los canales brutos o de bandas artificiales. Sobre las composiciones a color elegidas, las adaptaciones de la dinámica permiten realzar los contrastes. La interpretación posterior ofrece más datos para el estudio de las respuestas espectrales. Estos primeros tratamientos permiten identificar con más garantías las unidades predefinidas y distinguir en

algunos casos las unidades complejas (almendros-viñas). Entre los métodos clásicos, hemos utilizado el índice de Vegetación, el índice de Brillo y el Análisis en Componentes Principales.

El Índice de Vegetación ($XS3-XS2/XS3+XS2$) permite una diferenciación entre la vegetación activa y los suelos desnudos. Se ha combinado el índice de Vegetación de junio y el de octubre. El resultado confirma la necesidad de utilizar ambas imágenes para una mejor identificación de las unidades. Efectivamente, las zonas con una fuerte actividad vegetativa para las dos fechas se identifican con los regadíos al aire libre, la vegetación de los barrancos, el alcornocal, los encinares, y el matorral. Una parte de las parcelas de regadío son más activas en octubre y el desfase temporal entre las dos imágenes (1987-1988) unido a la rápida evolución de esta agricultura, provoca una heterogeneidad importante en las respuestas espectrales (deltas y laderas litorales). La discriminación entre las viñas y los almendros es en este caso posible, ya que la actividad vegetativa de los almendros es más fuerte en junio, mostrando las viñas valores más elevados en octubre.

La comparación a color de los índices de Brillo [$(XS2^2+XS3^2)^{1/2}$] de junio y octubre discrimina con más garantías los suelos desnudos, las zonas urbanas, las viviendas y los cultivos bajo plástico, que presentan altos valores en ambas fechas.

Finalmente el Análisis en Componentes Principales, que permite obtener tres canales poco correlacionados a partir de tres canales brutos, nos muestra cómo el canal ACP1 equivale al índice de Brillo, siendo el canal XS1 el que da el porcentaje de participación más importante para las dos fechas (alrededor de 37%), seguido de los canales XS2 y XS3 en proporciones semejantes (25%). Por su parte el canal ACP2 equivale al Índice de Vegetación, con una participación de un 64% del canal XS3 para junio y de un 69% para octubre (Matrices de combinaciones lineares). Las composiciones a color de los canales ACP1, ACP2 y ACP3 en junio y en octubre permite realzar las zonas con vegetación, principalmente en octubre, pero son sobre todo los diferentes tipos de suelo desnudo los que mejor se discriminan (el suelo desnudo sobre calizas, el suelo desnudo sobre esquistos y filitas, y los cultivos bajo plástico).

Fase de entrenamiento y estudio de respuestas espectrales

La fase de entrenamiento tiene como objetivo servir de base a una clasificación supervisada, pero ha sido utilizada igualmente para el análisis de las respuestas espectrales.

Elección de parcelas de entrenamiento

Esta etapa de trabajo ha conocido un cierto número de obstáculos. En primer lugar, el reducido tamaño de las parcelas de cultivo dificulta su deli-

mitación a pesar de la alta resolución de las imágenes SPOT XS. Por otra parte la heterogeneidad de las parcelas es generalizada para casi todas las unidades, salvo en el caso de los encinares o alcornoques y del matorral. La causa es la fuerte presencia de suelos desnudos o de suelos poco cubiertos. Pero el comportamiento es similar para la horticultura o la vegetación de los barrancos, debido a la escasa superficie ocupada. La existencia de píxeles puros en la imagen es pues muy limitada, determinando en las estadísticas desviaciones típicas muy elevadas.

En último lugar, la diversidad, ligada al relieve o al substrato, para una misma unidad de ocupación del suelo, es muy acusada en la imagen. La distribución de parcelas de entrenamiento ha tenido en cuenta esta diversidad y así la heterogeneidad en las clases es también importante, sobre todo en las bandas artificiales.

Elección de clases

La elección de las clases de las que hemos partido ha sido el resultado de la interpretación visual sobre los documentos ya citados y de nuestro conocimiento del terreno. Las clases definitivas (Figura 4) provienen de la validación entre clases, a partir del estudio de las estadísticas y de la clasificación de las parcelas (matriz de confusión).

Las reagrupaciones han sido realizadas según el grado de confusión entre las clases : los dos tipos de matorral; las clases suelos desnudos sobre calizas / zonas urbanas / cultivos bajo plástico; las clases suelos desnudos sobre esquistos y filitas y las ramblas.

Estudio de las respuestas espectrales en los canales brutos

Los tipos de curvas espectrales nos definen tres grupos de unidades (Figura 5).

- La vegetación activa y la agricultura de regadío (clases 1, 2 y 6).
- El matorral y los cultivos de secano (clases 3, 4 y 5).

- Las unidades de naturaleza lito-podológica y otras (clases 7 y 5).
- Es preciso señalar la importancia del canal XS1 para la diferenciación de unidades, sobre todo en la imagen de junio. En octubre las respuestas son más próximas, sobre todo en las unidades de matorral y de arboricultura. Sin embargo para ciertas clases es el canal XS3 de octubre el más discriminante. Es el caso de las viñas y los almendros, o de la horticultura y la vegetación de los barrancos.

Las clases 7, 8 y 1 se diferencian esencialmente por el nivel de respuestas en los canales XS1 y XS2. Las clases 3 y 6 son próximas en los canales XS1 y XS2 de junio, pero se alejan en el canal XS3 de junio y octubre. También las clases 2 y 6 tienen tendencia a aproximarse en los canales XS1 y XS2 de octubre, pero se pueden diferenciar en el canal XS3 o bien en XS1 y XS2 de junio. Finalmente las clases 3, 4 y 5, que presentan el mismo tipo de curvas, pueden discriminarse por sus valores más o menos elevados. La situación es menos clara para la clase de almendros y de viñas, salvo en el canal XS3 de octubre.

Clasificación baricéntrica de las parcelas y elección de canales

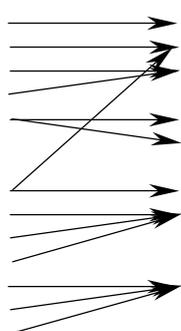
A partir de estas conclusiones se han ensayado diferentes combinaciones de canales brutos para la clasificación baricéntrica de parcelas. Las matrices de confusión son satisfactorias para las unidades de suelos y de vegetación, pero no para la distinción de las clases de almendros y viñas (15'3% para las viñas y 31'7% para los almendros en la combinación XS2- XS3 de junio y XS3 de octubre).

La utilización de bandas artificiales para la clasificación ha producido mejores resultados. Así la combinación del índice de Vegetación de junio y de octubre permite una buena distinción entre los almendros y las viñas, debido al cielo vegetativo de los cultivos. Igualmente ocurre con la vegetación de barrancos y la horticultura (Figura 5).

Clases iniciales

- 1- Alcornocal y encinares
- 2- Vegetación de barrancos
- 3- Matorral sobre calizas
- 4- Matorral sobre esquistos
- 5- Viñas y almendros
- 6- Regadío herbáceo y arbóreo
- 7- Cultivos bajo plástico
- 8- Zonas urbanas
- 9- Suelos desnudos sobre calizas
- 10- Suelos desnudos sobre filitas
- 11- Suelos desnudos sobre esquistos
- 12 Ramblas

Fusion/división



Clases definitivas

- 1- Alcornocal y encinares
- 2- Vegetación de barrancos y regadío arbóreo
- 3- Matorral
- 4- Viñas
- 5- Almendros
- 6- Regadío herbáceo
- 7- Cultivos bajo plástico, zonas urbanas y suelos desnudos sobre calizas
- 8- Suelos desnudos sobre filitas y esquistos. Ramblas

Fig. 4. Lista de clases iniciales y definitivas

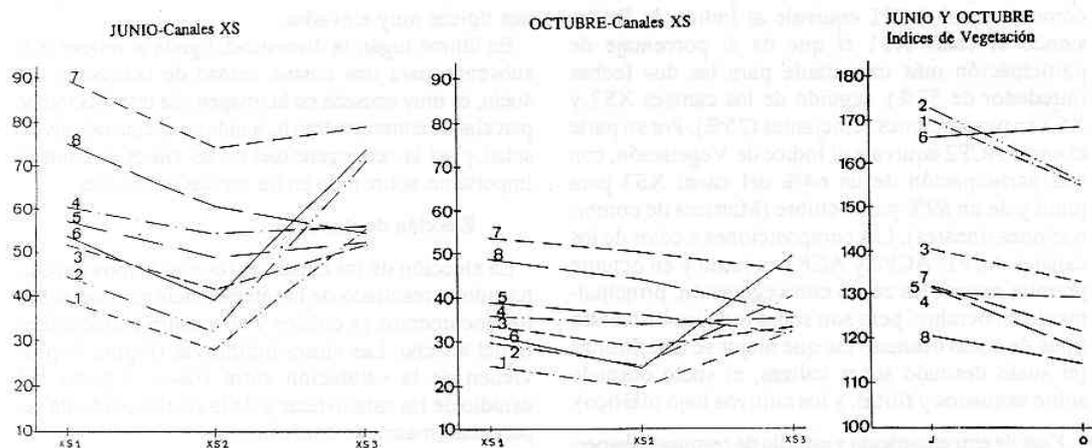


Fig. 5 - Curvas de respuestas espectrales

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0'0	96'3	2'6	1'0	0'0	0'0	0'0	0'0	0'0
2	0'0	7'8	58'6	8'6	0'0	0'8	21'2	0'0	0'0
3	0'0	0'0	0'0	87'2	12'1	0'8	0'0	0'0	0'0
4	0'0	0'0	0'0	4'0	73'9	11'4	0'0	0'0	10'8
5	0'0	0'0	0'0	0'2	3'6	86'3	0'0	4'6	5'1
6	0'0	0'0	14'8	5'1	1'1	0'6	78'1	0'0	0'0
7	0'5	0'0	0'0	0'0	0'7	0'0	0'0	88'7	10'1
8	0'4	0'0	0'1	0'0	4'8	4'3	0'1	0'0	89'6

Tabla 1 Matriz de confusión

Sin embargo una clasificación realizada solamente con los dos índices conduce a ciertas confusiones entre clases, como entre las unidades de encinas y alcornocques, y la vegetación de los barrancos.

La combinación del canal XS1 de junio (donde las respuestas están muy distribuidas) y los índices de Vegetación, a pesar de sus buenos resultados para la clase de los almendros, hace aparecer confusiones entre el matorral y la horticultura. Finalmente es la combinación del canal ACP1 de junio y de los Índices de Vegetación la más adecuada, al presentar este canal las ventajas del canal XS1 de junio pero también de los canales XS2 y XS3, eliminando las confusiones creadas.

La utilización de bandas artificiales aumenta la heterogeneidad de las parcelas y de las clases a nivel estadístico. Las desviaciones típicas de las unidades de vegetación se elevan en los Índices de Vegetación, sobretodo en octubre. En el canal ACP1 son sobretodo las clases de suelos y los almendros los que presentan los valores más altos de heterogeneidad.

La matriz de confusión (Tabla 1) nos muestra los siguientes resultados:

- La clase de alcornocques y encinas está muy bien clasificada (96'3%).
- La clase de la vegetación de barrancos y de frutales de regadío presenta unos resultados poco satisfactorios (58'62%). Esto es debido a la confusión con la clase anterior y el matorral, que se

explica por la real presencia de estas unidades en los barrancos, pero también por la confusión con la unidad de regadío herbáceo a causa de su fuerte actividad vegetativa.

- La clase matorral está bien clasificadas en un 87'2%, pero guarda una cierta confusión con las viñas (12%).
- La clase viñas, con un 73'9% bien clasificado, muestra sin embargo confusión con los almendros (11 %).
- La clase almendros obtiene uno de los mejores resultados de la clasificación (86'3%), aún cuando se confunde débilmente con los suelos desnudos sobre esquistos y filitas.
- La clase de horticultura, con un porcentaje de 78'1% bien clasificado, conserva la confusión con la vegetación de los barrancos y la arboricultura de regadío.
- La clase de suelos desnudos sobre calizas, zonas urbanas y cultivos bajo plástico, con un porcentaje de 88'7% bien clasificado, muestra una confusión de 10'1% con los suelos desnudos sobre filitas y esquistos, como consecuencia de la imbricación espacial de estas unidades.
- La clase de suelos desnudos sobre filitas y esquistos y las ramblas está bien clasificada (89'6%).

Estas confusiones provienen de las características propias del medio, como la existencia de encinas, alcornocques y matorral en los barrancos o la fuerte actividad vegetativa de la horticultura, de los

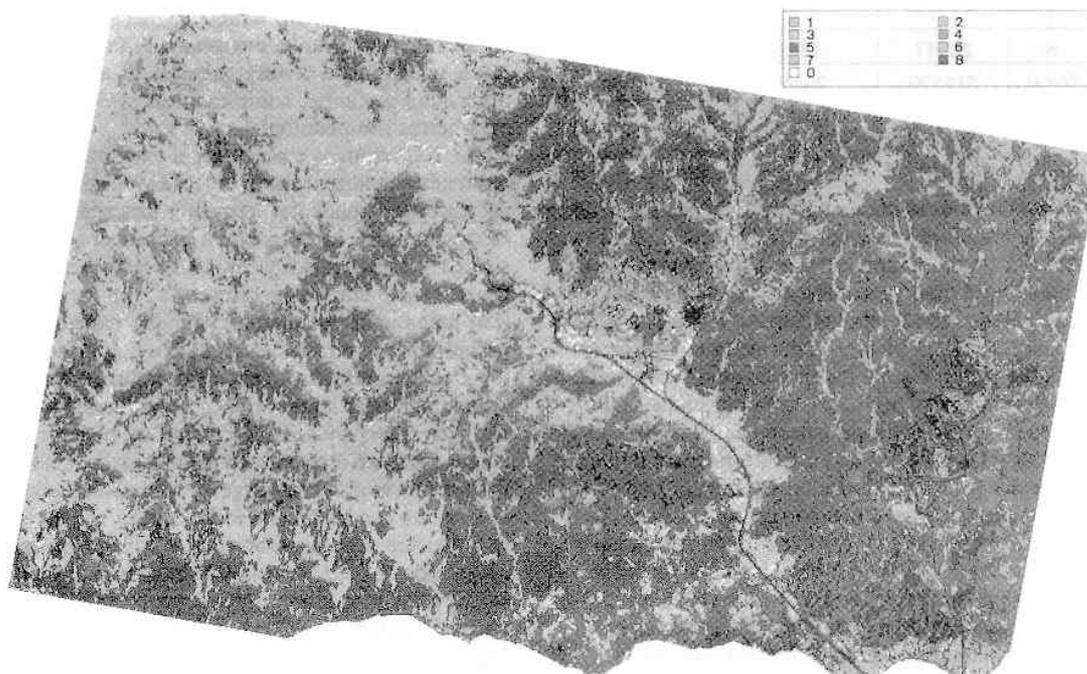


Fig 6. Imagen clasificada

frutales de regadío y de la vegetación de los barrancos. De igual forma la gradación de la cobertura vegetal entre las clases matorral - viñas - almendros - suelos desnudos sobre esquistos y filitas - suelos desnudos sobre calizas, crea "grosso modo" confusiones en cadena de una clase a la otra.

Clasificación. generalización a la imagen

Un clasificador de tipo baricéntrico ha sido aplicado a la imagen, eligiendo como canales los Índices de Vegetación de junio y de octubre y el canal ACPL de junio (Tabla 2). El resultado es una imagen clasificada y después perfeccionada con ayuda de diversas funciones como la eliminación de puntos dispersos (Figura 6).

CLASE	EFFECTIVOS	SUPERFICIE (ha)	OCUPACION
0	145415	5816'6	28'43
1	11331	453'2	2'22
2	12964	518'6	2'53
3	89868	3594'7	17'57
4	32550	1302'0	6'36
5	166272	6650'9	32'51
6	8981	359'2	1'76
7	15714	628'6	3'07
8	28547	1141'9	5'58
TOTAL	511520	20460'8	100'00

Tabla 2. Resultados de la clasificación

El porcentaje de píxeles no clasificados (28'43%) incluye los píxeles de valor 0 (25%) que rodean la parte útil de la imagen, así como los píxeles correspondientes al mar, ya que éstos no han sido considerados para la fase de aprendizaje.

Visualmente, la imagen clasificada es satisfactoria, teniendo en cuenta los límites de un método de

clasificación pixel por pixel, y no por parcelas. Los puntos no clasificados pertenecen a dos grupos : las sombras y las parcelas de horticultura que varían de una fecha a la otra (creación de nuevas parcelas, cambios de cultivos, elevación de los plásticos..).

A pesar de que se ha logrado delimitar las unidades elegidas, se observa una sobreestimación de la clase viñas en la parte oriental de la imagen, y una subestimación de los almendros al Oeste. Una segmentación de la imagen permitiría atenuar este efecto.

Una breve descripción de las clases puede completar la información que ofrece la imagen:

- Clase 1: Engloba el bosque de alcornoques situado al Noroeste de la imagen (Haza del lino), pero también los individuos de *Quercus Rotundifolia* o encinas que aparecen en los barrancos de la zona Oeste.
- Clase 2: Se trata de una clase mixta debido a la proximidad de respuestas espectrales. La vegetación arbórea de los barrancos corresponde a un conjunto muy variado de especies como el *Populus Ulmus* o la *Ceratonia Siliqua*. Esta formación aparece sobre todo en los barrancos del Oeste, pero también en algunos enclaves orientales. Los frutales de regadío marcan la transición entre las parcelas de horticultura de las vegas y las laderas de almendros.
- Clase 3: Esta clase comprende todas las formaciones arbustivas y herbáceas de la zona de estudio (desde el matorral de las cumbres calizas hasta las formaciones semiáridas costeras). Engloba también las parcelas de cultivos abandonados donde una cobertura vegetal está ya instalada. Su extensión es más importante en la zona

oeste de la imagen, pero aparece también en los barrancos orientales más áridos.

- Clase 4: Las viñas se sitúan sobre las cumbres ramificadas de la sierra, aprovechando las débiles pendientes. Su extensión es mucho más importante en la zona occidental de la imagen. En ocasiones en la misma parcela hay una coexistencia de viñas, higueras y almendros.
- Clase 5: Los almendros ocupan un 32'51% de la imagen de trabajo. Se extienden hacia el Este, donde forman un verdadero monocultivo. Al Oeste se sitúan junto a las parcelas de viñas. Su diversidad es fuerte, sobre todo en razón de los parámetros lito-pedológicos.
- Clase 6: La cultivos enarenados al exterior forman una unidad homogénea en el cauce del valle de Albuñol. Ocupan también las terrazas y bancales de las laderas litorales. La horticultura tradicional se sitúa alrededor de los pueblos y cortijos, en las laderas.
- Clase 7 -. Esta clase hace referencia a un conjunto muy heterogéneo de unidades aunque de respuestas radiométricas muy cercanas. Los cultivos enarenados bajo plástico ocupan los deltas costeros, pero también las laderas litorales, en coexistencia con los enarenados al exterior. Los pueblos y aldeas aparecen dispersos en la imagen de trabajo. Finalmente englobamos en esta unidad los suelos desnudos o semidesnudos sobre calizas, con escasa cobertura vegetal (arboricultura dispersa), así como todos aquellos enclaves caracterizados por su fuerte reflectividad (canteras, parcelas abandonadas sin cobertura vegetal, parcelas en labor..).
- Clase 8: Es también una clase heterogéneo de la que forman parte las ramblas, cuyo cauce se compone de depósitos aluviales, y los suelos desnudos sobre esquistos y filitas, que aparecen sobre todo al Sureste de la imagen y en las cumbres al Oeste.

La identidad de esta unidad proviene de la naturaleza litológica y de la débil cobertura vegetal, existiendo tan sólo almendros muy dispersos o matorral ralo.

EXPLOTACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Aproximación al relieve

La interpretación visual de la imagen y el análisis estadístico nos permiten extraer algunas conclusiones sobre la información que el MDT nos ofrece acerca del relieve, aunque eliminando en las estadísticas los píxeles de valor 0 que rodean la imagen. La imagen de actitudes se distribuye entre los valores 0 a 255 para altitudes comprendidas entre 0 y 1292 m. Su valor medio es de 79'37, aproximadamente 400 m.

La imagen de orientaciones o de azimut distribuye los valores de 0 a 255 para las orientaciones comprendidas entre 0 y 360 grados. Su valor medio es 66'87, correspondiente a 94\$40, es decir., una orientación Sureste. Un 31'99% de la imagen tiene una orientación Sur, Sureste y Suroeste, mientras que solamente un 10'31 % está orientada hacia el Norte. La imagen de pendientes distribuye 90 tonos de gris para 90 grados de pendiente. El valor medio es de 13'29. El 38'01% de la imagen presenta pendientes superiores a 20\$. Si se elimina el 25% de píxeles de valor 0 que rodean la imagen., esta cifra correspondo a un 50'66%.

Una composición a color de los tres planos hace destacar las zonas de elevada altitud y de escasa pendiente (cumbres de la zona occidental), las vertientes de orientación Noroeste y Norte y las zonas a baja altitud de pendiente suave (vertiente oriental de la cuenca de Albuñol, vertientes orientales de los valles litorales, laderas litorales y deltas) y las vertientes orientadas al Oeste de fuertes pendientes.

Combinación de la imagen dependientes y las imágenes SPOT XS

La combinación, en una composición a color, de, la imagen de pendientes y las bandas artificiales intenta poner en evidencia las zonas cubiertas de vegetación y las zonas desnudas, combinadas a la pendiente, con el objetivo de apreciar el riesgo de erosión. Los coeficientes de correlación no superan la cifra de 0'5. En efecto, no existe correspondencia entre pendientes y cobertura vegetal puesto que, por ejemplo, en las vegas bajas la horticultura presenta una fuerte actividad vegetativa, mientras que las cumbres de débiles pendientes mantienen respuestas próximas al suelo desnudo.

Se han ensayado diferentes composiciones a color con el Índice de Vegetación y de Brillo, pero el contraste es mayor utilizando los canales ACP1 y ACP2 dado el comportamiento del canal XS1 en la imagen de estudio. Entre las dos fechas se ha elegido la imagen de octubre puesto que la cobertura vegetal en las laderas es menos densa que en junio, y por lo tanto representa la situación más desfavorable.

En la composición a color de estos tres canales (pendientes en rojo, ACP2 en verde, y ACPL en azul) (Figura 7), el color verde corresponde a las zonas de actividad vegetativa importante y a las pendientes débiles o nulas: la horticultura al exterior (vegas y laderas litorales), los encinares y el alcornocal, el matorral de las cumbres y la vegetación de los barrancos. El color amarillo hace referencias zonas con vegetación pero sobre pendientes muy fuertes: ciertas laderas de umbría y las laderas escarpadas de los barrancos.

En azul claro se distinguen las zonas de fuerte reflectividad en general y débiles pendientes: suelos desnudos de las cumbres o zonas llanas, y los

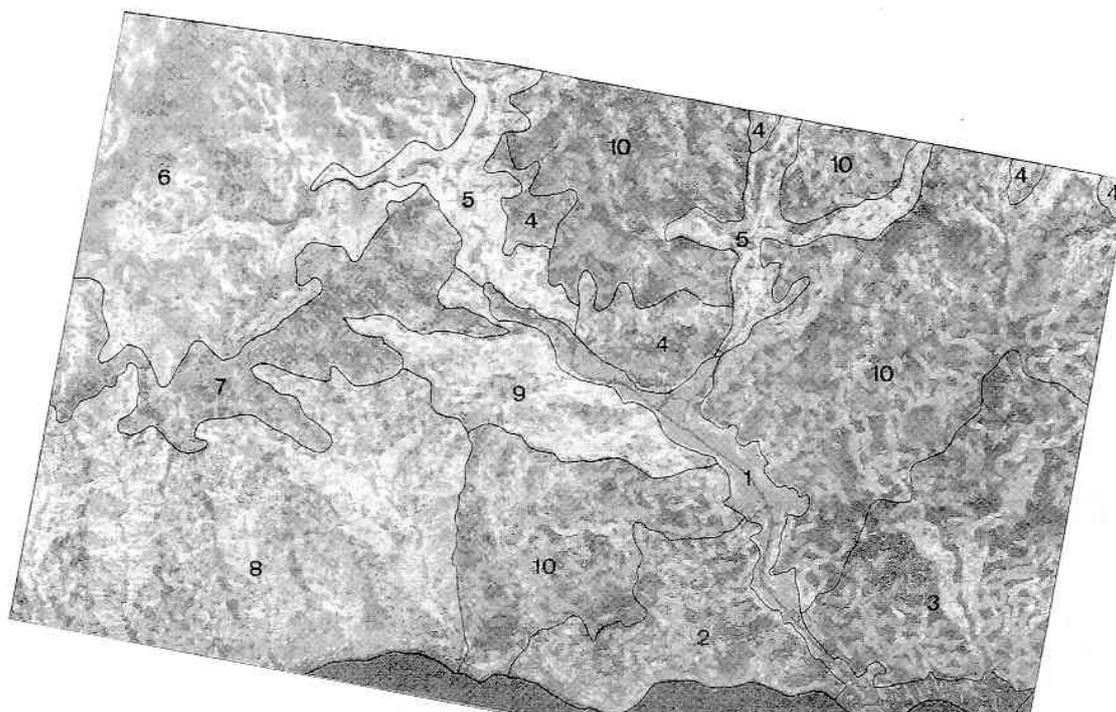


Fig. 7. Delimitación de zonas según el riesgo de erosión. Composición a color (Canal ACP1 octubre-azul, ACP2 octubre-verde, Imagen de pendientes-rojo).

cultivos bajo plástico. El color azul corresponde a las zonas desnudas y de débil pendiente, pero de reflectividad mucho menos elevada: suelos desnudos de las cumbres, deltas, ramblas... El color rojo (débiles valores en los canales ACP y fuerte pendiente) corresponde a las umbrías de la imagen.

El magenta hace aparecer las laderas semi desnudas de fuerte pendiente, que se distribuyen por una gran parte de la imagen. Un cálculo de binarización en la imagen de pendientes, tomando como umbral el valor 20, hace aumentar la presencia de este último color puesto que en las laderas con débil cobertura vegetal las pendientes superan por lo general los 20 grados de inclinación.

DELIMITACIÓN DE UNIDADES SEGUN EL RIESGO DE EROSIÓN

El proceso seguido, fundado en la interpretación de diferentes fuentes de información (documentos cartográficos, Imágenes SPOT XS, Modelo Digital del Terreno y campañas de campo) tenía como objetivo la segmentación de la imagen en función del riesgo erosivo potencial. Las unidades resultantes son superficies homogéneas determinadas en relación a este criterio. Cada una está caracterizada por uno o varios parámetros que influyen en su comportamiento cara a la erosión.

La composición a color de la imagen de pendientes y de los canales ACP1 y ACP2 de octubre nos ha servido como imagen de referencia para la delimitación visual de las unidades (Figura 7), sin embargo el resultado representa la síntesis de la información procedente de las fuentes citadas.

- Unidad 1: corresponde a la cuenca baja de Albuñol y deltas costeros de la Rábita y el Pozuelo. La altitud de esta unidad no supera los 300 metros y predominan las pendientes suaves o casi nulas. Sobre el manto de aluviones del fondo del valle se ha desarrollado una formación de suelos fluvisoles calcáreos, mientras que sobre las laderas bajas de micaesquistos son los cambisoles cálcicos los que se imponen. La expansión de la técnica del enarenado en los cultivos herbáceos de regadío que dominan en esta unidad, permite hablar de una nueva formación edáfica al tratarse de una reconstrucción casi total del suelo, como así se recoge en el Mapa de Suelos del Proyecto LUCDEME (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1986 y 1987). Las condiciones topográficas y la densa cobertura vegetal permiten hablar de un riesgo mínimo de erosión, siendo actualmente las pérdidas edáficas poco significativas.
- Unidad 2: se identifica con las laderas costeras abancaladas, situadas por debajo de los 400 metros de altitud y de pendientes medias y fuertes. El sustrato predominante está constituido por micaesquistos y cuarcitas alpujárrides, sobre los que se desarrollan regosoles calcáricos. En el caso de los cultivos forzados instalados en estas laderas tras los procesos de abancalamiento, se puede hablar, como en la unidad anterior, de una nueva formación edáfica. Junto a esta agricultura pervive la arboricultura de secano, principalmente almendros dispersos entre los escasos enclaves donde aún se conserva el matorral semiárido. Esta débil cobertura vegetal instalada sobre lade-

ras de fuerte inclinación determinan un riesgo de erosión elevado. Las pérdidas de suelo se sitúan por encima de las 200 toneladas anuales por hectárea en las laderas de fuertes pendientes que forman los acantilados costeros sobre regosoles calcáricos (M.A.P.A., 1990). Los fenómenos erosivos se rigen por la actividad de la red hidrográfica que origina una erosión en barrancos. A esta dinámica de tipo natural o climática, habría que añadir la dinámica antrópica provocada por el proceso de desmantelamiento de las laderas, lo que da lugar a fenómenos de concentración hídrica que pueden evolucionar a verdaderas cárcavas, o bien a un aumento generalizado de la erosión en regueros en aquellas vertientes desnudas que limitan las superficies de nueva creación.

- Unidad 3: se trata de una unidad caracterizada por un relieve abarrancado cercano a los badlands y de pendientes elevadas, desarrollado a partir de un sustrato de micaesquistos y filitas, sobre el que se ha instalado una formación de regosoles calcáricos. La cobertura vegetal es muy rala, formada por una arboricultura de almendros muy dispersos, formaciones de matorral serial y comunidades nitrófilas. Estas condiciones nos muestran una situación de riesgo erosivo muy elevado. Actualmente las pérdidas edáficas superan las 200 toneladas anuales por hectárea (M.A.P.A., 1990). Las manifestaciones superficiales de la erosión hídrica son frecuentes, como es el caso de la presencia generalizada de regueros en las parcelas abandonadas. La ausencia de arado provoca la evolución de estas formas hacia las cárcavas. Por otra parte la erosión remontante regida por la alta actividad de la red de drenaje se materializa en la formación de barrancos, configurando el paisaje incipiente de badlands.
- Unidad 4: corresponde a enclaves dispersos en la zona de estudio caracterizados principalmente por el predominio del sustrato calizo en laderas de pendientes suaves y moderadas. Sobre las calizas y los travertinos se han desarrollado litosoles y regosoles. La cobertura vegetal es muy rala, puesto que son los cultivos de secano (viñas y almendros) los que se han instalado beneficiándose de las condiciones topográficas. El riesgo de erosión puede considerarse medio, dadas las condiciones topográficas y el tipo de sustrato, lo que provoca pérdidas edáficas moderadas.
- Unidad 5: caracterizada asimismo por el sustrato calizo, en esta unidad las pendientes son muy fuertes, dando lugar a los cañones calizos de la Ventana Tectónica de Albuñol. La formación edáfica predominante, muy pobre, es la de los litosoles y regosoles. La cobertura vegetal es débil, dados los numerosos afloramientos rocosos que caracterizan los ámbitos calizos. El riesgo de erosión es medio o elevado, con fenómenos de tipo gravitacional. Las fuertes pendientes han

agudizado los procesos erosivos desarrollados sobre el sustrato calizo-dolomítico. Las pérdidas de suelo oscilan entre 25 y 50 toneladas anuales (M.A.P.A., 1990).

- Unidad 6: se trata de una unidad que ocupa la zona de cumbres, a actitudes que llegan a alcanzar los 1200 metros. Las pendientes son suaves en las lomas más elevadas, pero aumentan hacia las laderas colindantes. Los regosoles y litosoles se han desarrollado sobre los micaesquistos y cuarcitas del sustrato. Bajo el alcornoque se conservan los regosoles eútricos y los luvisoles crómicos. La cobertura vegetal está compuesta por formaciones arbóreas, como es el caso del alcornoque del Haza del Lino, y arbustivas, que conviven con la agricultura de secano, principalmente viñas e higueras. El riesgo de erosión puede considerarse débil en la zona del alcornoque, donde la protección edáfica permite una situación aceptable de pérdida de suelo. Según los estudios del ICONA (M.A.P.A., 1990), las pérdidas oscilan entre 5 y 12 toneladas por año. En el caso de las áreas agrícolas, las pérdidas edáficas son superiores, existiendo una dinámica de erosión laminar muy desarrollada.
- Unidad 7: corresponde a los interfluvios que parten de la zona de cumbres hacia la costa, a una altitud inferior a 1000 metros, y donde las pendientes son suaves y moderadas. Los regosoles calcáricos se han desarrollado sobre los micaesquistos y cuarcitas que forman el sustrato. La cobertura vegetal está compuesta principalmente por la arboricultura de secano (almendros) y las viñas. El riesgo de erosión es medio o elevado. Al igual que en la unidad anterior, las manifestaciones superficiales de la erosión hídrica son importantes. Las pérdidas edáficas son elevadas en el caso de las áreas agrícolas (en torno a 200 toneladas por año).
- Unidad 8: identificada con el relieve de espolones (García Manrique, 1974), esta unidad se caracteriza por las fuertes pendientes de las laderas y la orientación norte-sur de las lomas. Sobre los micaesquistos y cuarcitas se desarrollan litosoles y regosoles eútricos, mientras que en algunos enclaves más favorables son los regosoles eútricos los que se instalan. En ambos casos se trata de suelos muy pobres. La cobertura vegetal se caracteriza por una escasa arboricultura y por formaciones de matorral serial o comunidades nitrófilas muy degradadas. El riesgo de erosión es elevado. Las pérdidas anuales por hectárea son superiores a las 200 toneladas (M.A.P.A., 1990). Sólo se observa una disminución (50-100 y 25-50) en las laderas cubiertas de matorral. La erosión dominante está regida por la actividad de la red hidrográfica y se caracteriza por la formación de barrancos y cárcavas.
- Unidad 9: corresponde a la umbría oeste de la cuenca de Albuñol, orientada al NE y de fuertes pendientes. Los regosoles calcáricos se han des-

arrollado sobre los micaesquistos y cuarcitas. La cobertura vegetal es densa, compuesta por formaciones arbustivas y en algunos Los arbóreas (vegetación de barrancos y encinares), aunque conviviendo con la arboricultura de secano. El riesgo de erosión es medio, atenuándose actualmente las pérdidas edáficas en razón de la protección vegetal.

- Unidad 10. se trata de la unidad de mayor extensión en la zona de estudio, y viene identificada por las laderas de pendientes moderadas a fuertes cubiertas en su mayor parte por el almendro. El sustrato predominante está formado por micaesquistos y cuarcitas, desarrollándose sobre ellos regosoles calcáricos. La cobertura vegetal es débil, compuesta por un monocultivo de almendros dispersos y sucios desnudos, sólo interrumpido por enclaves donde se mantiene un matorral serial degradado. El riesgo de erosión es muy elevado y las pérdidas edáficas actualmente superan las 200 toneladas por año (M.A.P.A., 1990). La dinámica erosiva se caracteriza por la formación de cárcavas y barrancos muy activos.

CONCLUSIONES

La segmentación de la zona de estudio según el riesgo de erosión es la conclusión más significativa de esta investigación. Las unidades delimitadas muestran una situación generalizada de alto riesgo, matizada según la pendiente, la cobertura vegetal o el sustrato. Las actuales pérdidas edáficas por año superan las 200 toneladas por hectárea en la mayor parte del macizo, especialmente en las laderas de fuerte pendiente cubiertas por una arboricultura dispersa. Sólo las vegas y formaciones deltaicas costeras, así como las áreas con una densa cobertura vegetal, presentan pérdidas edáficas poco significativas, siendo el riesgo erosivo sensiblemente inferior.

Con respecto a las fuentes y metodología empleada, la corrección radiométrica de las imágenes nos ha permitido acceder a una delimitación de unidades de ocupación de suelos, una vez eliminada la presencia de sombras. Por otra parte, el hecho de disponer de dos imágenes de fechas diferentes a lo largo del año ha hecho posible la identificación y discriminación de ciertos cultivos. La interpretación visual o analógica resulta muy adecuada para el análisis de la información relativa a la ocupación del suelo. Su combinación con los tratamientos

digitales clásicos nos ha conducido a resultados interesantes, sobre todo a partir de la creación de bandas artificiales. La clasificación, como imagen de síntesis, presenta las ventajas propias del método elegido, aunque siempre existirá una limitación ligada al principio de la clasificación pixel por pixel. A pesar de la complejidad de la imagen, se ha obtenido una leyenda que recoge la variedad de usos y que discrimina con garantías aquellos más conflictivos, como es el caso de los almendros y las viñas.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMACHO OLMEDO, M.T. 1995. *Cartografía de los Paisajes erosivos de la Sierra de la Contraviesa*. Universidad de Granada. Diputación Provincial de Granada (en prensa).
- CAMACHO OLMEDO, M.T. 1994. Delimitación y caracterización de los paisajes erosivos de una montaña mediterránea: Sierra de la Contraviesa (Provincias de Granada y Almería). *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada* n°20-21.
- GARCÍA MANRIQUE, E. 1973. El viñedo en la costa alpujarreña. *Estudios Geográficos* XXXIV, pp 501-538. CSIC.
- GIRARD, M.C. y GIRARD, C.M. 1989. *Télédétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales*. Collection Sciences Agronomiques. Masson. Paris.
- KING, C. 1985. *Etude des sols et des formations par Télédétection. Approche de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles dans le visible et le proche infrarouge*. Tesis Doctoral. BRGM. Paris Grignon.
- MEGZARI, O. 1984. *Utilisation des inodèles numériques du Terrain (MNT) en Télédétection*. Tesis Doctoral. Universidad Paul Sabatier. Toulouse.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. 1990. *Mapa de Estados erosivos*. Cuenca Hidrológica del Sur de España. ICONA.
- NAERT, B. 1985. Caractérisation de la signature spectrale, spatiale et temporelle des vignes et vergers. Application à la Télédétection du sol et de la culture. *III Coloquio Internacional sobre respuestas espectrales en Teledetección*. Les Arcs, 1984.
- PROY, C. 1986. *Intégration du relief au traitements d'images de Télédétection*. Tesis Doctoral. Instituto Nacional Politécnico de Toulouse.
- RODRÍGUEZ MARTINEZ, F. 1985. *Granada. Medio Físico y Desarrollo*. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Granada.
- YANG, C.J. 1990. *Corrections radiométriques des effets topographiques sur les images satellitaires*. Tesis Doctoral. Universidad Paul Sabatier de Toulouse. Laboratorio Común de Teledetección CEMAGREF/ENGREF, Montpellier.