

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES CON HETEROGENEIDAD DE GRANO FINO: EL CASO DEL PAISAJE KÁRSTICO DEL PARAJE NATURAL DEL TORCAL DE ANTEQUERA

J.A. CARREIRA y F.X. NIELL

Departamento de Ecología, Universidad de Málaga. Málaga.

RESUMEN

Las técnicas de teledetección espacial representan una potente herramienta para la evaluación de recursos e interpretación del paisaje a gran escala, circunstancia en la que un exhaustivo muestreo de campo resultaría económicamente inviable. Sin embargo, aparecen limitaciones si la heterogeneidad espacial es alta o se produce la manifestación de repetitiva de "patterns" a muy pequeña escala. Tal situación concurre en paisajes kársticos muy desarrollados, como por ejemplo en el Paraje Natural del Torcal de Antequera (Málaga): las estructuras geomorfológicas y su vegetación asociada están finamente fractalizadas, con unidades (corredores kársticos, torcas y dolinas, caos de bloques...) que son del orden de magnitud de la resolución espacial que proveen imágenes obtenidas con sensores del tipo Thematic Mapper de la serie Landsat. En este caso, junto a la fotointerpretación, ha resultado de utilidad la aplicación de técnicas de procesamiento digital entre las que destacan distintos tipos de filtros (direccionales, laplacianos, filtros smoothing) que contrastan aquellas estructuras.

ABSTRACT

Remote sensing represent a powerfull tool for large scale resource survey and landscape analysis, when intensive field sampling becomes economically unviable. Nevertheless, some restrictions appear whether high spatial heterogeneity or repetitive patterns are present at small scales. That is the case of fully developed karstic areas as "El Torcal de Antequera" Natural Park (Málaga): geomorphologic features and vegetation are finely fractalized, with terrain unit size (karstic corridors, dolines, chaotic stones...) nearly the spatial resolution provided e.g. by the Thematic Mapper sensors of the Landsat serie. Under these conditions, together with photointerpretation, it has been usefull the application of several digital processing techniques such as image filtering (directional and non-directional high-pass filters, low-pass filters) in order to reveal karstic features. Key words.- Karstic areas, terrain units, lineaments, remote sensing, image filtering.

1. INTRODUCCIÓN

El Paraje Natural del Torcal de Antequera (Figura 1) es uno de los más singulares ejemplos de paisaje kárstico de Europa. Tiene la particularidad de ser un macizo netamente individualizado de su entorno y que, en una extensión relativamente reducida (1.200 has en su parte principal), agrupa ejemplos bien desarrollados de casi todas las formas típicas del modelado kárstico. En su conjunto, El Torcal tiene el aspecto de una amplia mesa de bordes abruptos que se alza entre las suaves colinas del Trías circundante. Dicho carácter tabular (común los karst de mesa) da la sensación en su conjunto de una topografía no excesivamente contrastada. Sin embargo, en detalle, los corredores kársticos compartimentan fuertemente el espacio y dan lugar a un paisaje con gran heterogeneidad de grano fino, en el que determinados patrones de distribución espacial se manifiestan de forma repetitiva a diferentes escalas.

Existen diversos estudios en los que se constata que estas particularidades de los paisajes kársticos suponen limitaciones para la interpretación de imágenes obtenidas con sensores remotos (Sesoren 1985, Nossin 1989; Fasatwi 1990; entre otros). Las estructuras geomorfológicas y su vegetación asociada se disponen entre sí de un modo fractalizado, análogo por ejemplo a la ciudad de calles aleatorias de Mandelbrot (1987). Así, el tamaño de las unidades de terreno resultantes (corredores kársticos, dolinas y torcas, caos de bloques...) son del orden de magnitud de la resolución espacial que proveen imágenes obtenidas con sensores del tipo Thematic Mapper de la serie Landsat. Además, la uniformidad litológica y de tipo de vegetación que suelen concurrir en los paisajes kársticos supone asimismo la existencia de escasos contrastes en las características de reflectancia, lo que representa problemas de interpretación relacionados con la resolución espectral.

La mejora en resolución espacial y la visión estereoscópi-

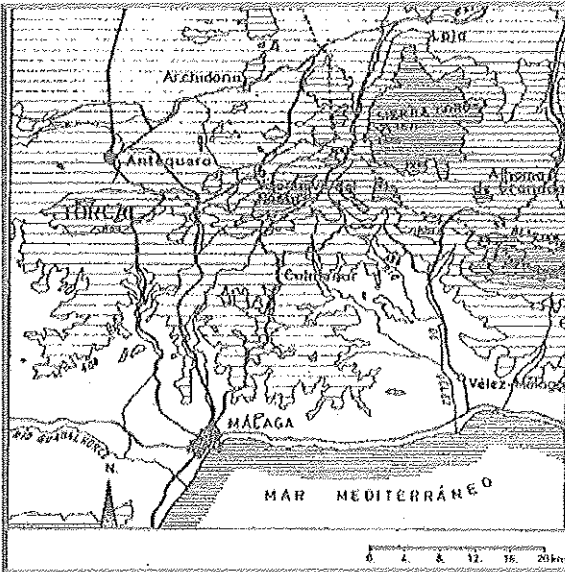


Figura 1.- Situación geográfica del Torcal de Antequera (Málaga).

ca de imágenes Spot han demostrado ser mejoras sensibles para la interpretabilidad de rasgos geomorfológicos kársticos de superficie (véase por ejemplo el trabajo de Nossin, 1989, en la región de Anatolia, Turquía). Para imágenes obtenidas con sensores de menor resolución especial, ciertas herramientas de procesamiento digital de imágenes, como el uso de filtros, son de utilidad. Rasgos que suponen cambios bruscos de valores de reflectancia (lineamientos, escarpes...) pueden destacarse mediante filtros "high pass", en tanto que los de baja frecuencia (fronteras graduales) e imbricaciones de manchas de grano fino y muy digitadas requieren filtros "low pass".

El objeto de este trabajo es comprobar la utilidad de algunas de estas técnicas de análisis digital en la interpretabilidad del paisaje kárstico del Torcal de Antequera y su comparación con las ideas establecidas en la bibliografía y que fueron deducidas mediante fotointerpretación (nos referimos básicamente a los trabajos de Peyre (1974), Fernández & Delgado (1975) y Pezzi (1975).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se han empleado datos Thematic Mapper tomados el 2 de

noviembre de 1984. El marco empleado corresponde a las coordenadas N37-327, W4-42; con centro de latitud 37,27, longitud -4,37. Las cintas fueron procesadas en el laboratorio de procesamiento digital del International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC, The Netherlands) mediante un sistema ILWIS. Se emplearon las bandas individuales, una imagen compuesta y otra en color falso con las bandas TM 2, 3 y 4 para el análisis general de las unidades de terreno. Una primera clasificación automática por el método del K-vecino más próximo arrojó como resultado un gran número de píxel de adscripción incierta y manchas irregularmente distribuidas de pequeño tamaño. La clasificación se mejoraba sobre imágenes sometidas a "smoothing" con preservación de fronteras mediante el filtro de la mediana. Con objeto de mejorar la detectabilidad de los rasgos kársticos, en particular los lineamientos, se emplearon varios filtros de alta frecuencia no direccionales (Laplaciano) y direccionales (edge-senh-cosh). Para contrastar la información extraíble de las imágenes se realizaron una exhaustiva revisión bibliográfica (se citan en cada caso en el texto) y numerosas visitas al área.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Identificación de unidades litológicas y de terreno de la región del Torcal.

Debido al relieve diferencial que producen y a su elevada reflectancia, las formaciones de calizas Jurásicas de la Unidad

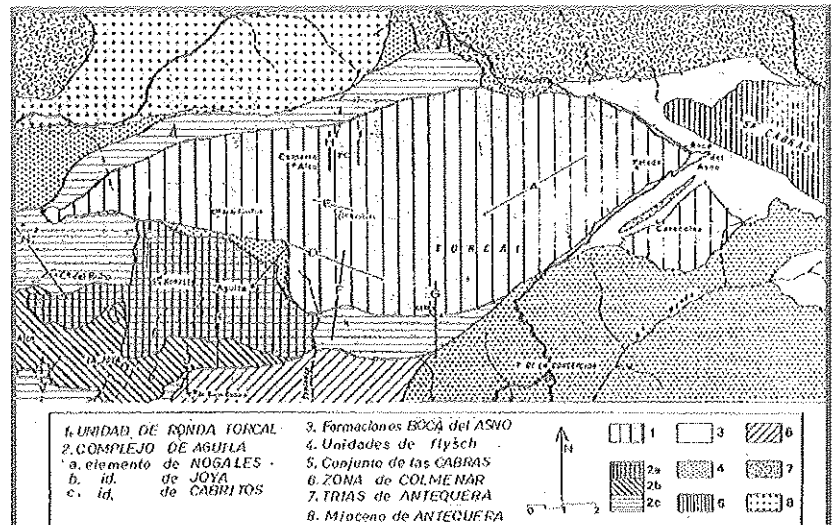


Figura 2.- Esquema estructural de la región del Torcal Antequera (tomado de Peyre 1974).

de Ronda-Torcal (véase Figura 2, tomada de Peyre, 1974) aparecen bien contrastadas tanto en las imágenes de bandas individuales (Imagen 1, banda TM 5) como en imágenes compuestas (Imágenes 2 y 3), y no sólo en aquellos afloramientos de grandes dimensiones (Sierra de las Chimeneas y el propio Torcal) sino también en subunidades dispersas co-

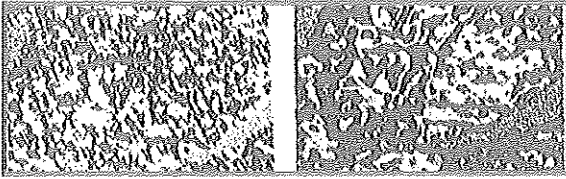


Figura 3.- Ejemplo, para la zona central del Torcal de Antequera, de la realización de un análisis de clasificación automática con dos categorías (afloramientos rocosos, vegetación) sobre imágenes con y sin la aplicación de un filtro "smoothing" de la mediana.

mo por ejemplo el bloque desgajado al Sureste del Torcal que constituye la Sierra de Caracoles.

Cuando se efectúa una clasificación automática, la elevada compartimentación del espacio a pequeña escala de la parte central del Torcal determina que aparezcan un gran número de píxeles mixtos, y que las manchas sean de muy pequeño tamaño e íntimamente imbricadas entre sí incluso aunque sólo se consideren dos grandes categorías de terreno (afloramientos rocosos y vegetación). La aplicación de un filtro "smoothing" permite cierta homogeneización que sería deseable para una cartografía (Figura 3). Debido a ello y a que la proporción de áreas rocosas es relativamente mayor, el reconocimiento de zonas con vegetación es difícil incluso aunque ésta sea exuberante (lo que ocurre en ocasiones, por ejemplo, en varios de los corredores kársticos). En todo caso, las áreas con vegetación más desarrollada se llegan a diferenciar por sus tonos ligeramente rosados en la imagen de color falso, por ejemplo las augales y pastos de la Sierra Pelada (parte oriental del Torcal), y los espinares y bosquetes de encinar mixto de algunos corredores kársticos de la parte más interna del retículo (Torcal Alto).

El Triás se reconoce bien en la parte superior derecha de las imágenes por la textura que da su relieve suave de pequeñas colinas (textura relativamente fina) y el drenaje dendrítico que se asocia a las margas y yesos. Estas áreas tienen un uso ganadero extensivo y están ocupadas por tomillares y chaparrales (matices rosáceos y rojizos en la Imagen 2). Las zonas de areniscas biotíticas del Mioceno de Antequera se reconocen en la parte superior izquierda de las imágenes gracias a su drenaje dendrítico-paralelo y textura más gruesa.

Respecto a las unidades de flysch, el reconocimiento de las zonas con afloramiento arcillosos eocénicos en el área de Villanueva de la Concepción viene propiciado por su relieve

poco contrastado y valores relativamente elevados de reflectancia (véase cualquiera de las imágenes) que derivan de su uso agrícola marginal, lo que en la fecha de toma de la imagen equivalente a suelos en barbecho o recién sembrados. Los afloramientos dispersos de estratos de areniscas oligocénicas de grano grueso, normalmente alargados, resaltan en la Imagen 2 como delgadas bandas rojizas dentro las zonas arcillosas a causa de la elevada reflectancia en la banda TM4 de los bosquetes de alcornoque y jarales que se instalan sobre ellas.

Existen más dificultades para el reconocimiento de los elementos del complejo del Aguila, en la parte suroccidental de las imágenes, aunque destacan claramente en la de falso color los encinares sobre el elemento de los Nogales.

3.2. Interpretabilidad del paisaje kárstico de El Torcal de Antequera.

Tectónica:

A la escala de las imágenes (aprox. 1:112.000), no se aprecian indicios del modelado kárstico en las Sierras de Chimeneas y de las Cabras, debido a que el buzamiento de los estratos impide un desarrollo más allá del lapiaz superficial.

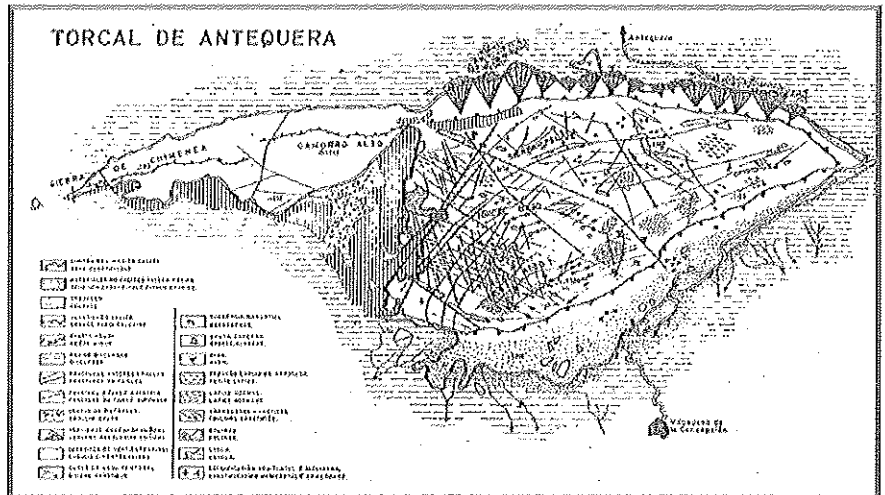


Figura 4.- Esquema geomorfológico del Torcal de Antequera (tomado de Pezzi, 1977).

Esto contrasta fuertemente con lo que ocurre en El Torcal, en el que destaca su morfología tabular que revela una estructura tectónica en forma de pliegue de champiñón con amplia charnela subhorizontal (Peyre, 1974). El buzamiento hacia los bordes se aprecia en la zona occidental, en la que los estratos de calizas Jurásicas duras se hunden bajo margocalizas y calizas margosas con facies de capas rojas de Rosalina del Cretáceo superior (Cruz Sanjulián et al., 1973). Tales facies se pueden distinguir por sus tonos rosados en la imagen compuesta de las bandas TW 1, 2 y 3 (Imagen 3).

Serie estratigráfica:

Todos los tramos de la serie estratigráfica del Torcal (se si-



Imagen 1.- Imagen de la región del Torcal de Antequera, con realce lineal de la banda TM 5. Véase Anexo de color.



Imagen 2.- Imagen en color falso de la región del Torcal de Antequera, compuesta con las bandas TM2, 3 y 4. Véase Anexo de color.



Imagen 3.- Imagen de la región del Torcal de Antequera compuesta con las bandas TM 1,2 y 3. Véase Anexo de color.

que a Cruz Sanjulian, 1973, y Pezzi, 1975) se pueden reconocer en las imágenes teledetectadas (Imágenes 1, 2 y 3). Su diferenciación se debe más a la morfología que originan a consecuencia de su distinta competencia frente al modelado kárstico (cambios de textura en las imágenes) que a variaciones en sus características espectrales (matiz de color).

Desde el Este hacia el Oeste, se distingue el afloramiento sucesivo de materiales cada vez más modernos. Dentro de la serie Jurásica, el tramo de calizas más antiguas (oolíticas, del Jurásico inferior), muy denudadas y que desarrollan a lo máximo un lapiaz de arroyada, se aprecia en las imágenes como una cuña triangular con escaso diaclasamiento en la porción más oriental del Torcal (Sierra Pelada). La banda con valores de mayor reflectancia que aparece en la zona central corresponde a calizas nodulosas y noduloso-brechoideas de edad intermedia (Oxfordense medio hasta Dimmeridgiense inferior, siempre según Cruz Sanjulian et al., 1973). La acción del modelado kárstico en estas calizas da lugar a bloques de roca tabulares con el borde superior plano, lo que justificaría su mayor reflectancia. En la visión estereoscópica, este tramo aparece como varios segmentos escalonados que se levantan sobre el conjunto (aquí se encuentra la altura máxima del macizo) por acción de fallas paralelas del sistema de dirección N 118 (véase lineamientos, más adelante). En el área con aspecto reticulado más desarrollado (porción occidental) aflora mayoritariamente el tramo más joven de la serie Jurásica (calizas clásticas, Kimmeridgiense y Titónico superior), que es el miembro más competente de la serie para el modelado kárstico. Los materiales cretácicos (calizas margosas y margocalizas) sólo afloran en el extremo occidental del macizo, y se distinguen en las imágenes por la ausencia de diaclasamiento y su textura más homogénea. Como ya se indicó anteriormente, debido a que presenta facies de Rosalina, este tramo se puede reconocer por sus tonos rosados en la imagen de color compuesto (Imagen 3).

Lineamientos y diaclasado:

La zona centro-occidental del Torcal aparece en las imágenes extraordinariamente fracturada (véase cualquiera de las imágenes). Fernández-Rubio & Delgado (1975) confirmaron, mediante un estudio estadístico por ordenador de 500 planos de fractura, la idea apuntada inicialmente por Peyre (1974) de que son dos las redes principales de disyunción que condicionan el modelado kárstico en El Torcal (véase Figura 4, tomada de Pezzi, 1977). Una primera red, estaría constituida por pequeñas fracturas y diaclasas con distribución densa y direcciones preferentes N 83° y N 155°. Esta se inscribe dentro de una segunda red poco densa pero constituida por fallas importantes de dirección N 40° y N 110°, posteriores en el tiempo. Tales redes se interpretarían como el resultado de la reacción de la losa caliza a las compresiones, una primera, moderada, preferentemente dirigida en dirección N 119°, y otra mucho más reciente, y de dirección más incierta (posiblemente N 75°) por actuar sobre materiales previamente diaclasados, con las correspondientes anisotropías (Fernández-Rubio & Delgado, 1975). Las formas kársticas están ordenadas básicamente siguiendo las direcciones impuestas por este sistema de diaclasamiento (Cabanás 1960).

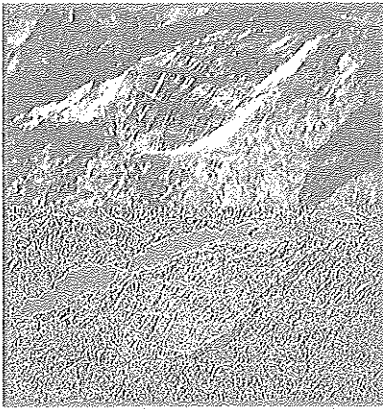


Imagen 4.- Aplicación de un filtro no-direccional laplaciano a la banda TM 1. Véase Anexo de color.

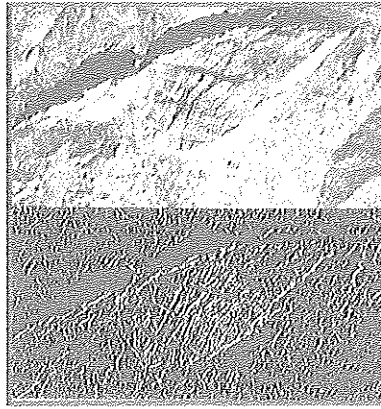


Imagen 5.- Aplicación a la banda TM 5 de un filtro direccional de gradiente EFDX para realzar los lineamientos con dirección norte-sur. Véase Anexo de color.

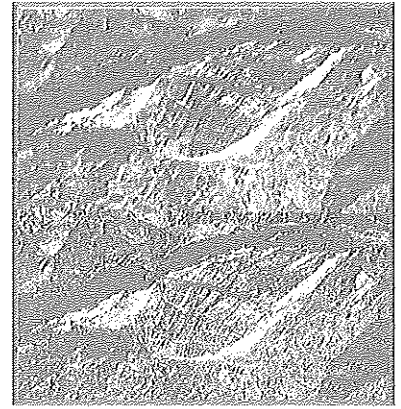


Imagen 6.- Resultado de la suma a la imagen original de un filtro direccional (Edge-senh+cosh) para realzar la red de diaclasamiento del Torcal de Antequera. Véase Anexo de color.

La segunda red, de fracturas mayores, es claramente visible incluso en las imágenes de satélite sin ningún tipo de procesamiento de realce y, por supuesto, en aquellas sometidas sólo a contraste lineal (Imagen 1). Por el contrario, la resolución espacial de las imágenes es insuficiente para la distinción nítida de la red de diaclasas menores.

La aplicación de un filtro no direccional "laplaciano" revela el retículo principal de fracturas en la zona central del macizo (Imagen 4). No obstante, en la imagen aparece gran cantidad de "ruido" ya que este tipo de filtros tiene una mayor respuesta a puntos o manchas aisladas que a la existencia de una frontera de borde lineal (Donker & Soeter, 1988). Además, los rasgos lineales paralelos a la dirección de movimiento del filtro quedan eliminados (Sabins, 1986).

Para poner de manifiesto la red ordenada de diaclasamiento resultó más adecuado el uso de filtros direccionales. Por ejemplo, el primer grupo de fracturas de la red principal, de dirección N 40°, queda bien definido tras la aplicación de un filtro de gradiente en dirección Este-Oeste (DFDX) que resalta los rasgos con orientación Norte-Sur (Imagen 5) y elimina los perpendiculares a esta dirección. Asimismo, se distingue con nitidez el cambio de dirección que este juego de fracturas sufre en la zona nororiental del macizo hacia dirección N 70° (y N 135° para el otro juego de la misma red), que ya había sido identificado por fotointerpretación e interpretado como el resultado de un giro dextrógiro de 30° (Fernández-Rubio & Delgado, 1975) que habría provocado el cabalgamiento local del Torcal hacia el Sur en la zona de la Boca del Asno (Peyre, 1974).

Si se añade a la imagen original la suma de la aplicación de sendos barridos con filtros gradiente multiplicados por el seno y coseno del ángulo de los lineamientos con la dirección Norte, se realza claramente la red principal de fallas debido a su carácter casi ortogonal (Imagen 6). Esta transformación revela nuevas fracturas de la misma red pero con menor tamaño y que se inscriben dentro de las celdillas individuales del retículo de la imagen original. Ello sugiere una

estructura fractal (Mandelbrot, 1982) subyacente a las redes de diaclasamiento de los paisajes kársticos, con la repetición del mismo motivo (reticulación en este caso) a distintas escalas (autosimilaridad); estructura que ha demostrado tener un carácter relativamente universal en el paisaje y otros aspectos ambientales (Burrough, 1981).

La red de pequeñas diaclasas de dirección N 83° y N 155° sólo es observable con claridad en fotografías aéreas. En las imágenes teledetectadas no se han apreciado con nitidez debido a su escasa anchura (pocos metros), menor en la mayoría de los casos al límite de resolución espacial (30 x 30 m para sensores Thematic Mapper). No obstante, en la Imagen 6 aparecen levemente definidas algunas diaclasas N 85° en la zona sur-occidental del Torcal y, aún en menor grado, las de dirección N 155°. Como ha demostrado Nossin (1989), este tipo de rasgos geomorfológicos de pequeña escala del modelado kárstico sí pueden ser captados con imágenes Spot combinando el modo pancromático (10 x 10 m de resolución espacial).

Otras formas del modelado kárstico:

Sólo las formas kársticas de mayor tamaño son apreciables en las imágenes Thematic Mapper, en particular los corredores kársticos de mayor anchura delimitados entre fallas paralelas (véase en las imágenes la parte occidental del macizo), o aquellos asociados a diaclasas de gran recorrido (zona central).

Entre las depresiones cerradas, sólo la Uvala del Navazo (zona occidental del Torcal), asociada a fallas normales, es fácilmente distinguible por su gran tamaño y por tener la forma de una incisión a modo de cuña entre escarpes abruptos (Imágenes 1, 2 y 3).

Algunas de las dolinas de mayor tamaño (véase esquema geomorfológico, Figura 4) llegan a distinguirse como pequeñas manchas ovoideas oscuras en varias de las imágenes, en particular los grupos situados por fuera del escarpe Sur del macizo y desarrollados sobre depósitos de vertiente cementados (Riss).

4. AGRADECIMIENTOS

Se agradecen al I.T.C. (International Institute for Survey and Earth Sciences, The Netherlands) las facilidades prestadas para el procesamiento digital de las imágenes, y en particular a

los profesores Nossin y Donker del Departamento de Geología de la citada institución por su asistencia y disponibilidad.

5. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BURROUGH, P.A. (1981): Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature*, 294: 240-242.
- ✓ CABANAS, R. (1960): El Torcal de Antequera, un típico karst de mesa. *Est. Geogr.* 78: 63-82. Universidad de Granada.
- ✓ CRUZ SANJULIÁN, J.; OLORIZ, F. & SEQUEIROS, L. (1973): El Jurásico Superior entre El Torcal de Antequera y Cañete La Real (Cordilleras Béticas, Región Occidental). *Cuad. Geol.* 4: 15-25. Universidad de Granada.
- ✓ DONKER, N.H.W. & SOETER, I.R. (1988): *Digital image processing subjects for the R.S. application course for earth sciences*. Tex Books, ITC, The Netherlands.
- ✓ FASATWI, Y.A. & VAN DIJK, P.M. (1990): Lineament and geomorphic analysis of remote sensing data as an aid to hydrocarbon exploration, Sirt Basin, Lybia. *ITC Journal*, 1990-2: 137-144.
- ✓ FERNÁNDEZ RÚBIO, R. & DELGADO ALMENDROS, J. (1975): Fisuración y karstificación del Torcal de Antequera (Málaga). *Cuad. Geol. S.M.I.* 93-107.
- ✓ MANDELBROT, B. (1987): *Los objetos fractales*. Tusquets eds. Superinfimos 8, 213 pp. Barcelona.
- ✓ NOSSIN, J.J. (1989): Spot Stereo interpretation in karst terrain, Southern Turkey. *ITC Journal*, 1989-2: 79-91.
- ✓ PEYRE, Y. (1974): Geologie d'Antequera et de sa region, Cordilleres Bétiques, Spagne. *Trav. Laborat. Geol. Medit. I.* 325-387. Inst. Nat. Agron. Paris.
- ✓ PEZZI, M.C. (1975): Le Torcal d'Antequera (Andalousie): un karst structural retouché par le periglaciaire. *Mediterranée* 2: 23-27.
- ✓ PEZZI, M.C. (1977): Morfología kárstica del sector central de la cordillera Subbética. *Cuad. Geográficos, Universidad de Granada*. Tesis doctorales-Serie Monografía 2. 288 pp.
- ✓ SABINS, F.F. (1986): *Remote sensing, Principles and interpretation*. W.H. Freeman & Company eds. 449 pp. New York.
- ✓ SESOREN, A. (1985): Potential of remote sensing use in a karstic area Antalya region in the south of Turkey. *Proc. Symp. Karst. Water Res., Ankara-Antalya, IAHS Publ. n° 161*: 271-277.