

DISCRIMINACIÓN DE GYPSISOLES MEDIANTE EL SENSOR ETM+ DEL SATÉLITE LANDSAT-7

M. P. GARCÍA RODRÍGUEZ y M. E. PÉREZ GONZÁLEZ

Dep. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Fac. Geografía e Historia Univer. Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid, Proyecto PR- 48/01-9852, Mpilarg@eucmax.sim.ucm.es

Abstract. In this paper the ETM+ sensor of Landsat-7 is used to discriminate soils developed on materials with marls and gypsums in the Southeast of the Community of Madrid (Spain). The gypsisol distribution, their bright colours, the scarce vegetal coverland and the high level of erosion let both a visual and a digital discrimination as opposed to other covers and materials. In this respect the ETM+ images are useful to study soil variability in semi-arid environments, although is very difficult discriminate soil units. To accomplish the present research work, a visual analysis has been carried out (through various spectral band combinations, spectral and radiometric enhancements), together with a digital analysis and a supervised classification through minimum distance criteria.

Key words: Remote sensing, Landsat-7 ETM+, gypsisols.

Resumen. En este trabajo se utiliza el sensor ETM+ del satélite Landsat-7 con el objetivo de diferenciar los suelos desarrollados sobre materiales margo-yesíferos en el sudeste de la Comunidad de Madrid. La distribución de los gypsisoles, sus colores claros, su escaso recubrimiento vegetal y el alto grado de erosión, permiten su discriminación, tanto visual como digitalmente, frente a otras cubiertas y materiales. Así, las imágenes del sensor ETM+ resultan útiles para estudiar la variabilidad de los suelos en zonas semiáridas, aunque resulta difícil llegar a precisar más allá del nivel de asociación. Para efectuar el presente estudio se ha realizado un análisis visual (mediante composiciones en color de distintas bandas y mejoras radiométricas y espectrales), un análisis digital y se ha obtenido una clasificación supervisada utilizando el criterio de la mínima distancia.

Palabras clave: Teledetección, Landsat-7 ETM+, gypsisoles.

INTRODUCCIÓN

El sensor ETM+ del satélite Landsat 7 fue puesto en funcionamiento por la NASA en abril de 1999, empezándose a procesar sus imágenes en Europa a partir de junio de ese mismo año. Respecto a su precursor, el sensor TM del Landsat 5, tiene algunas mejoras, tanto espaciales como radiométricas. El sensor ETM+ tiene una mayor resolución espacial en los canales térmicos, ya que pasa de

los 120 m en el TM a los 60 m; además este sensor aunque mantiene los 30 m de resolución en las bandas del visible e infrarrojo próximo y medio, incluye una banda pancromática con 15 m de resolución. Las bandas térmicas se desdoblán en dos canales, el 6 y 8, con una longitud de onda de 11,5 a 12,5 y de 10,5 a 11,5 micrómetros respectivamente. Por estas razones supone una mejora para los estudios del medio físico.

El objetivo de este trabajo es tratar de discriminar la superficie dominada por gypsisoles en el sureste de la comunidad de Madrid, en el límite con las provincias de Toledo y Cuenca, y comparar los resultados con los obtenidos por otros investigadores con los sensores TM y MSS del Landsat-5.

Se ha escogido este tipo de suelos por ser representativo del sur de la Comunidad de Madrid, suficientemente extenso y fácilmente observable desde el espacio debido a sus colores claros y al escaso recubrimiento vegetal. Además están perfectamente delimitados en el mapa de suelos 1:200.000 realizado por Monturiol y Alcalá (1990a), así como en otras cartografías tradicionales (Gumuzzio y Alvarez, 1984; Nieves y Gómez, 1992; Olmos, 1996) y mediante teledetección (Labrandero y de Lera, 1988). Asimismo, los gypsisoles españoles se han reconocido internacionalmente (Duchaufour, 1977) y en el centro de la península ibérica alcanzan una considerable extensión e importancia, siendo además muy susceptibles a la erosión.

Los suelos de zonas semiáridas han sido objeto de estudio, mediante técnicas de teledetección, por numerosos autores. Entre ellos destacamos los trabajos de Goossens *et al.* (1998, 1999), Koch (2000) y Schmid *et al.* (2000) en los que se exponen las dificultades para discriminar los diferentes materiales. Algunos de estos estudios se basan en datos obtenidos con sensores de gran resolución espectral transportados en aviones. Con estos sensores multiespectrales se obtienen imágenes de una mayor calidad, lo que unido a la mayor resolución espacial (próxima a los cinco metros) facilita la discriminación de las cubiertas.

En cuanto a la aplicación de la teledetección en la cartografía de suelos, García y Muñoz (1998) han revisado numerosos trabajos que muestran la complejidad de factores y propiedades del suelo que intervienen en la respuesta espectral.

A pesar de todas estas dificultades, el objetivo del presente estudio es comprobar, en un área bien conocida, si el sensor ETM+ tiene alguna ventaja respecto a otros sensores y si sirve de complemento a la cartografía tradicional, con el fin de extrapolar estos resultados a otras áreas donde aún no estén suficientemente bien cartografiadas estas unidades de suelos.

ÁREA DE ESTUDIO

En la Comunidad de Madrid los gypsisoles se localizan (Monturiol y Alcalá, 1990a) en el sudeste de la provincia, entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama, en el límite con las provincias de Cuenca y Toledo (Fig. 1). También aparece una pequeña mancha en el nordeste de la Comunidad, en las proximidades de Torrelaguna. Dada la mayor extensión de la primera área nos hemos centrado en ella para realizar el estudio.

Los materiales sobre los que se desarrollan estos suelos corresponden a sedimentos químicos y detríticos del Mioceno del relleno Terciario de la cuenca del Tajo, depositados en una cuenca endorreica, bajo condiciones áridas: margas, yesos, arcillas, etc. Estos materiales conforman escarpes que pueden alcanzar más de 100 metros, aunque se localizan también en los conos de deyección e incluso en los fondos de los valles. Los colores varían desde blancos a grisáceos. Se han datado (IGME 1968 y 1975a, b, c, d) como Burdigaliense-Vindoboniense, con una gran variedad litológica que incluye numerosos cambios laterales de facies. Las mayores extensiones corresponden a formaciones en las que alternan capas de yesos con cristales especulares, yesos masivos y margas grises, muchas de ellas yesíferas, dominando los tonos grises (concretamente en el área de Ontígola los colores varían desde 10YR 7/2 y 5Y 6/2), aunque también hay materiales más blancos (yesos sacaroideos) o verdosos. Estas facies ocupan la parte central de la cuenca del



Fuente: Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid (Monturiol y Alcalá, 1990)

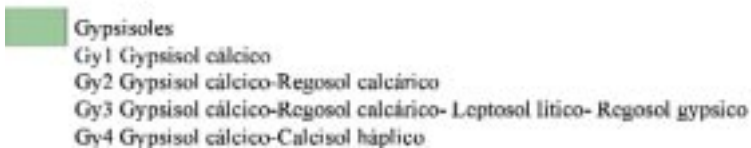


FIGURA 1. Área de estudio y localización de las asociaciones de los suelos del sureste de Madrid.

Tajo y tienen intercalaciones de sales magnésicas como glauberita, thenardita y mirabilita e incluso sal común. Hacia los bordes se intercalan con facies detríticas constituidas por arcillas pardo-rojizas. También existen intercalaciones con calizas, que constituyen facies intermedias entre las detríticas del borde y las evaporíticas del centro de la cuenca. Sobre estos materiales se depositaron, recubriéndolos en parte, las calizas lacustres del Pontense.

El área de estudio tiene un clima Mediterráneo templado, con una temperatura media anual entre 12 y 16° C, una precipitación media entre 400 y 600 mm y una E.T.P de 800 a 900 mm.

Biogeográficamente corresponde a la región Mediterránea, en la provincia castellano-maestrazgo-manchega, sector manchego (Peinado y Rivas, 1987). En cuanto al biocli-

ma, pertenece al piso mesomediterráneo. La vegetación es muy escasa, constituida fundamentalmente por plantas gipsícolas y calcícolas, adaptadas a climas xéricos, la mayoría correspondientes al estrato arbustivo.

Según Monturiol y Alcalá (1990 a), los suelos clasificados como gypsisoles (FAO, 1989), corresponden, la mayoría, a gypsisoles cálcicos, y se encuentran en asociación con regosoles gípsicos y calcáricos y con calcisoles háplicos y leptosoles líticos. A su vez, como suelo asociado aparece junto con fluvisoles calcáricos, regosoles calcáricos y leptosoles eútricos. Según estos autores son suelos muy calizos, con pH elevado, alta saturación en bases, textura franco arcillosa y con problemas de salinidad. Su extensión en la comunidad de Madrid es de aproximadamente 25.500 ha, ocupando un 3,2% de la misma. Según Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1999) estos suelos

se clasificarían como Aridisoles (Gipsisorthids). Su régimen de humedad es xérico y el de temperatura méxico.

Actualmente, el área de estudio está fuertemente antropizada, localizándose, sobre ella o en sus alrededores, municipios con elevada densidad demográfica: Aranjuez, Ciempozuelos, Chinchón, Fuentidueña de Tajo, etc. Además se encuentra en el área de influencia de Madrid, por lo que la proliferación de residencias secundarias conduce a la desaparición de gran parte de estos suelos. En el Mapa de Capacidad de Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid (Monturiol y Alcalá, 1990 b), los gypsisoles aparecen en tres clases y cuatro subclases: Bs (limitados por un pequeño contenido salino), Ch (con problemas hidromórficos), Cs (con sales), y De (con problemas de erosión). La mayoría están cubiertos por matorral xerófito muy ralo y apenas están cultivados. La mayor parte de estos gypsisoles corresponden a la clase De, por lo que necesitarían medidas de protección y conservación, que impidieran su erosión.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para efectuar este estudio se ha utilizado la imagen 201/032 del sensor ETM+ del satélite Landsat-7, con fecha de adquisición 20-8-1999. Esta escena tiene 185 x 185 km y comprende la provincia de Madrid y parte de las de Toledo, Guadalajara, Cuenca, Ávila y Segovia. El sensor pasa a las 10:48 horas (TMG), una hora más tarde que el sensor TM de Landsat-5. Se han procesado las ocho bandas del visible e infrarrojos, con resolución de 30 m para los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7, y 60 m para los canales térmicos 6 y 8. Asimismo se ha procesado la imagen pancromática con una resolución de 15 metros.

El tratamiento de la imagen se ha llevado a cabo con el programa ERDAS Imagine 8.3.1, efectuándose un análisis visual y un tratamiento digital. Se han hecho correccio-

nes geométricas, georreferenciándose la imagen al sistema UTM. Por motivos técnicos ha sido imposible efectuar correcciones atmosféricas. Sin embargo, sí se han realizado mejoras radiométricas y espectrales: ecualización del histograma, combinaciones entre bandas, índices de vegetación y minerales. El índice mineral utilizado se ha formado por la composición en color de tres nuevas bandas constituidas a partir de los cocientes entre los canales 5/7, 5/4 y 3/1 asignándole respectivamente los colores rojo, verde y azul. También se ha efectuado una composición hidrotermal (5/7, 3/1 y 4/3) y un análisis factorial en componentes principales, con el fin de obtener una mejora visual que permita resaltar mejor los gypsisoles. Los índices citados han sido utilizados en numerosos estudios (Drury, 1987; Mulders, 1987; García *et al.*, en prensa), dirigidos a discriminar distintas litologías. Se han realizado cortes espaciales y espectrales para comparar los valores digitales de los gypsisoles, frente a los de otros suelos próximos del área de estudio. Para ello se han tomado siete áreas de entrenamiento: en los materiales margo-yesíferos y calcáreos sobre los que se desarrollan calcisoles y cambisoles, en los yesos sobre los que se forman los gypsisoles, en las cárcavas próximas a los principales ríos, en las parcelas puestas en regadío en núcleos rurales, en tierras dedicada al cultivo de cereales en secano, ya recolectados en el mes de agosto y por último se ha escogido una clase relativamente heterogénea, a la que hemos denominado "parcela mixta", que corresponde a parcelas situadas, muchas de ellas, en las márgenes del río Tajo; en la actualidad estas parcelas son utilizadas para la construcción de viviendas residenciales con pequeños jardines o se dejan para pequeñas extensiones de labor intensiva, con barbecho blanco, o pastizales. Cada área de entrenamiento se ha tomado a partir de varios puntos de muestreo, con extensión variable, dependiendo del tipo de cubierta. Con ellas se ha efectuado una clasificación supervisada

siguiendo el criterio de la mínima distancia. Se ha escogido este algoritmo después de realizar diferentes pruebas con otros como el de máxima probabilidad y el de la distancia de Mahalanobis y comprobar que los resultados eran menos satisfactorios. Esta comprobación se ha hecho visualmente teniendo en cuenta el conocimiento de la verdad terreno.

La información del satélite se ha contrastado con el mapa de suelos de la figura 1, aunque también se han realizado trabajos de campo con el fin de confirmar la presencia y distribución de estas asociaciones de suelos. Sería conveniente poder realizar mediadas con espectrorradiómetros de campo, así como obtener los espectros, en laboratorio, de los horizontes superficiales del suelo, si bien esto no ha sido posible en el presente trabajo, por carecer del instrumental necesario.

RESULTADOS Y DISCUSION

Al efectuar un análisis visual con las diferentes bandas del sensor ETM+ se observa que los yesos y materiales margo-yesíferos y calcáreos se discriminan con mayor nitidez en las bandas del visible, canales 1 (Fig. 2a), 2 y 3, resaltando con tonalidades claras (incluso blancas), frente a los canales infrarrojos en los que se confunden con otros materiales. Esto confirma los resultados que las autoras ya habían obtenido en áreas ricas en yesos y sales en la región de La Mancha (García y Pérez, 1999) con el sensor TM y los que Labradero y de Lera (1988) habían señalado en los sedimentos yesíferos de Madrid: mejor discriminación en la banda 4 (visible) para el sensor MSS. Las bandas térmicas (en la figura 2b se muestra la banda 8) muestran como las áreas ricas en yesos y calizas tienen temperaturas más altas, a pesar de su mayor albedo. Esto puede deberse, en parte, a un menor contenido en humedad y vegetación, lo que hace que, en el mes de agosto, a estas horas de la mañana, el suelo se haya calentado más que el de otros materiales próximos. Las tem-

peraturas son más elevadas que en los núcleos urbanos y sobre todo que en la ciudad de Madrid (Pérez y García, 2001), por lo que el núcleo urbano se destaca en el noroeste de la imagen (Fig. 2b), con tonos muy oscuros; no hay muchas diferencias entre los dos canales (8 y 6), si bien la discriminación es más nítida en la banda 8. También se ha analizado la banda pancromática, ya que su mayor resolución espacial permite una mejora visual observándose bien la heterogeneidad existente en los materiales yesíferos y margo-yesíferos (Fig. 2c). Los tonos blancos permiten delimitar los sectores con gypsisoles, si bien puede haber pequeñas confusiones con otras unidades de suelos, especialmente con los calcisoles y/o regosoles. Esta imagen permite observar bien las áreas más erosionadas, cárcavas, redes de drenaje, cauces de los ríos e infraestructuras viarias.

En cuanto a las combinaciones entre distintas bandas se ha podido observar que la combinación en color real (Fig. 2d) permite delimitar bien las áreas yesíferas, ya que adquieren un tono azulado, si bien tienen el problema de confundirse con los núcleos urbanos, de los que sí se distinguen en otras combinaciones. En la combinación en falso color 4-3-2 (asignándole los cañones rojo, verde y azul respectivamente, Fig. 2e) contrastan bien estas áreas con las que tienen mayor vegetación, especialmente las áreas de regadío y se confirma lo señalado por Labradero y de Lera (1988) respecto a una buena visualización de los patrones de drenaje, sólo comparables estos últimos con su buena diferenciación en la banda pancromática. Las combinaciones 5-2-1 (Fig. 2f) y 4-7-1 (Fig. 3a) son también muy buenas para separar diferentes unidades litológico-geomorfológicas: así, se aprecian con nitidez los sedimentos yesíferos, frente a los materiales pliocenos y las calizas de los páramos que aparecen en estas combinaciones con tonalidades marrones (5-2-1) o verdes (4-7-1) e incluso, a diferencia del color natural, se dis-

tinguen bien de los núcleos urbanos ya que ofrecen tonos más intensos en azul-morado. Las combinaciones 7-5-4 (Fig. 3b) y 5-7-3 (Fig. 3c) permiten resaltar las áreas erosionadas en los materiales margo yesíferos que constituyen las distintas unidades de suelos y en los aportes cuaternarios. En estas combinaciones no se discriminan tan claramente los distintos sedimentos, pero sí resaltan en colores muy oscuros los que aparecen más erosionados, así como las redes de drenaje. Por el contrario hay combinaciones que conducen a equívocos: así, la 4-3-5, 1-4-5, 1-7-3 y 1-7-5 confunden las áreas yesíferas con los núcleos urbanos, y la 3-5-7 mezcla los gypsisoles con otras unidades de suelos como calcisoles, regosoles y cambisoles.

Para una mejor interpretación visual de los gypsisoles se ha efectuado una serie de mejoras radiométricas y espectrales. Entre ellas destacamos el índice de vegetación normalizado (relación entre la suma y diferencia de los canales 4 y 3), que permite separar los sectores en los que apenas hay vegetación como son los puntos donde aparecen los gypsisoles, de aquellos con mayor cubierta (Fig. 3d). En esta imagen los gypsisoles aparecen en tonos muy oscuros, aunque se confunden con otros suelos en los que también la vegetación es escasa: calcisoles, regosoles y algunos cambisoles. Por el contrario, obtenemos

mejor discriminación de esta unidad utilizando índices en los que se resalte la composición litológica. Así, con el índice mineral los suelos ricos en yesos aparecen en tonos morados (Fig. 3e), por lo que son fácilmente discriminables. Estableciendo una composición hidrotermal también se pueden distinguir en tonos azulados, si bien se confunden con los calcisoles, por lo que su extensión parece mayor, aunque ambas unidades se discriminan muy bien del resto (Fig. 3f), diferenciándose en tonos granate los materiales más degradados. Por el contrario los índices minerales en los que sólo se consideran dos bandas no dan buenos resultados (índices de arcillas, ferroso, de óxidos de hierro, etc.), por lo que sus imágenes no las hemos incluido en el presente trabajo.

Entre las mejoras espectrales también se ha efectuado un análisis factorial en componentes principales. En la imagen obtenida las áreas de yesos se confunden con otros suelos constituidos a partir de materiales claros y con poca vegetación y con los núcleos urbanos, por lo que no resulta muy útil para nuestro estudio, independientemente del número de componentes que utilizemos, si bien la diferenciación es más clara cuando se consideran sólo los cuatro primeros componentes, ya que en este caso no se confunden con los núcleos urbanos.

TABLA 1 – Valores digitales máximos y mínimos de las clases consideradas.

	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6		Banda7		Banda8	
	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn
S.margo-yesífero	114	186	113	205	133	255	123	225	160	255	165	176	110	228	211	232
Yesos	99	168	94	168	107	202	96	166	128	237	164	174	85	192	210	228
Cárcava	79	121	67	121	69	161	85	132	94	189	159	183	52	153	199	243
Regadío	68	95	53	90	42	96	91	212	48	129	139	146	25	83	166	176
Urbano	71	151	52	142	45	168	44	131	37	197	142	161	32	193	169	206
Secano	78	130	73	139	99	189	87	160	123	215	164	172	95	171	209	225
Parcela mixta	64	108	48	108	37	143	29	130	14	167	137	176	10	150	162	232



Fig. 2a. Banda 1 (azul)



Fig. 2b. Banda 8 (térmica)



Fig. 2c. Pancromático.



Fig. 2d. Combinación 3-2-1 (R-V-A)



Fig. 2e. Combinación 4-3-2

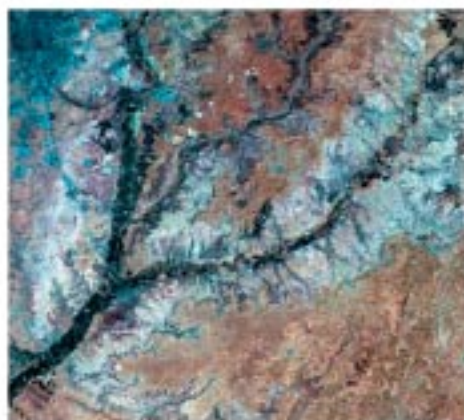


Fig. 2f. Combinación 5-2-1

FIGURA 2. Imágenes derivadas de la escena ETM+, 20-8-1999

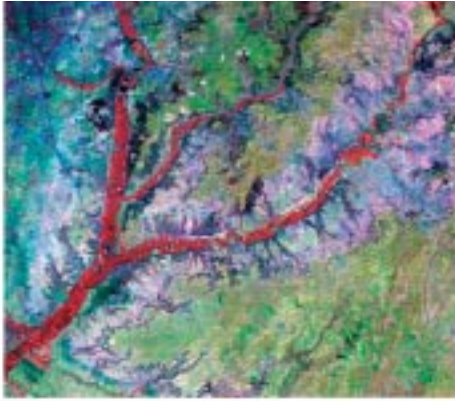


Fig. 3a. Combinación 4-7-1



Fig. 3b. Combinación 7-5-4

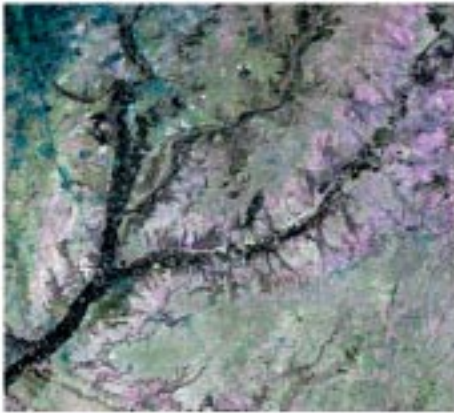


Fig. 3c. Combinación 5-7-3



Fig. 3d. Índice Vegetación Normalizado

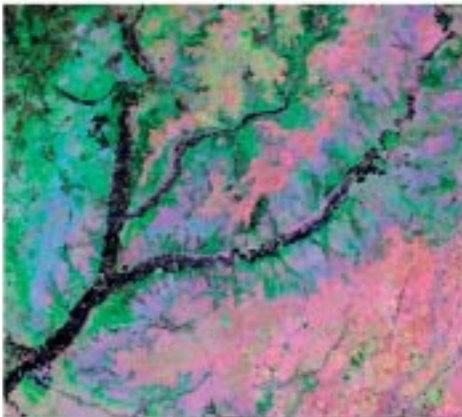


Fig. 3 e. Índice mineral



Fig. 3 f. Composición hidrotermal

FIGURA 3. Imágenes derivadas de la escena ETM+, 20-8-1999 (continuación).

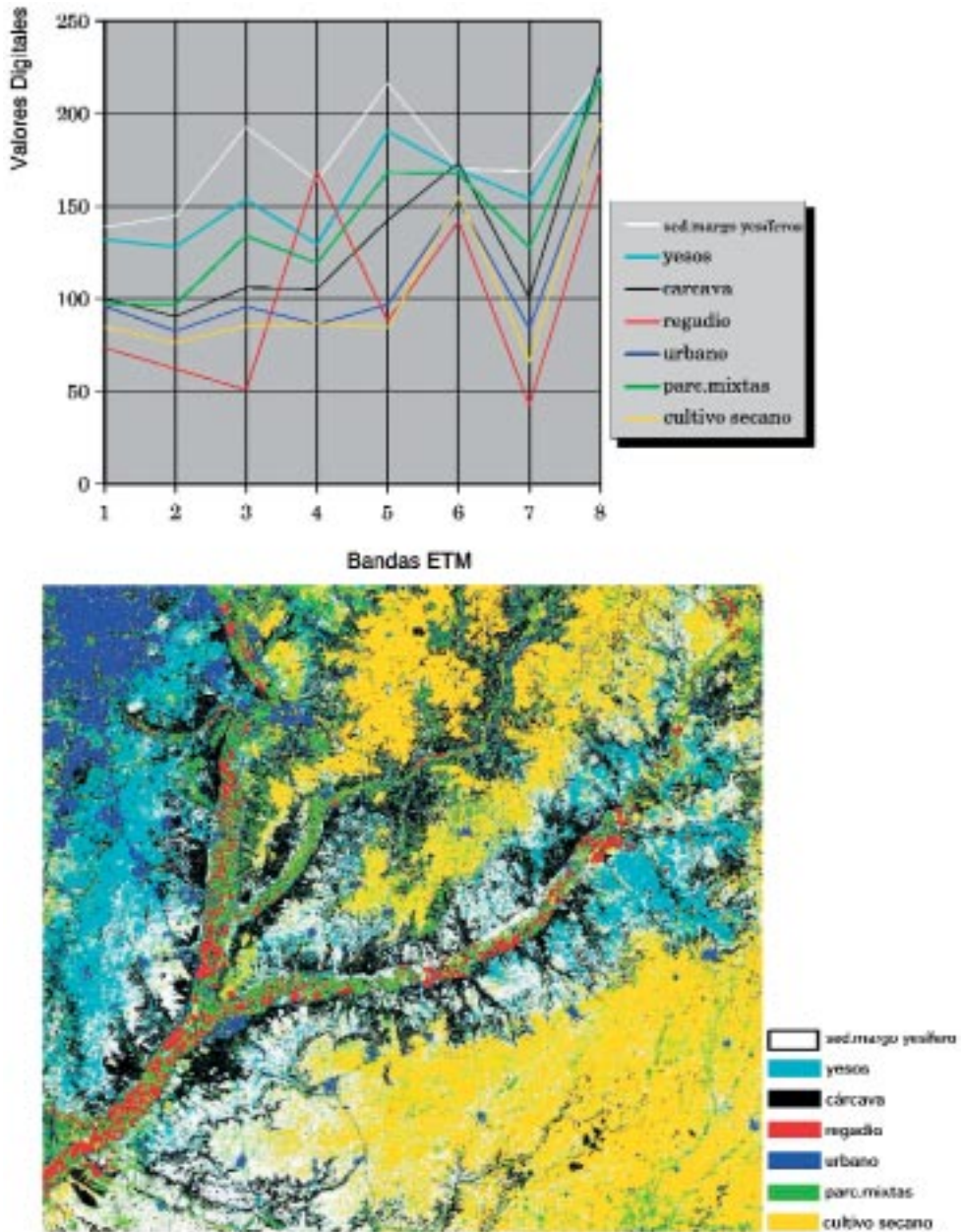


FIGURA 4. Valores espectrales y clasificación supervisada.

En cuanto al análisis digital, se ha realizado cortes espaciales y espectrales en el área de estudio analizando los valores digitales en las ocho bandas, con el fin de comparar las

muestras de gypsisoles, con las de otros tipos de cubiertas y suelos. Además se han considerado siete áreas de entrenamiento, explicadas en el apartado de material y métodos,

representativas de los distintos materiales: las clases informacionales corresponden a clases espectrales suficientemente diferenciadas, tal como se comprueba en el análisis estadístico (Tabla 1) de los datos originales.

Como se observa en la figura 4a los sedimentos margo-yesíferos y calcáreos tienen los valores digitales más elevados en todas las bandas, salvo las térmicas, destacando la banda cinco con valores próximos a 220. También los gypsisoles tienen una signatura espectral similar, aunque con valores más bajos, debido no tanto a la composición del material como al hecho de que con frecuencia se encuentran en las facies de las cuevas, frente a la clase anterior localizada en superficies más planas, por lo que la reflectividad es menor. Por debajo de éstas se encuentra la signatura de las parcelas dedicadas a secano, muchas de ellas sobre materiales pliocenos o de finales del mioceno. Las cárcavas y, en general todas las áreas muy erosionadas (que afectan con frecuencia a materiales cuaternarios), presentan una signatura característica ya que tienen valores bajos en las bandas visibles e infrarrojos próximos y más altos que otras muestras en las bandas térmicas. Esto es debido a su situación, orientación y fuerte pendiente, lo que permite establecer una buena cartografía de ellas y separar todas estas áreas fuertemente erosionadas independientemente del material del que estén constituidas. Las parcelas puestas en regadío y con una gran vigorosidad vegetal en el mes de agosto presentan una curva totalmente diferente al resto de las muestras, ya que tiene los valores más altos en el canal 4, con valores muy bajos en la banda 7 y en los visibles debido a la absorción por la clorofila y a la gran humedad que presentan. Por esta última razón mantienen también las temperaturas más bajas. La muestra tomada en parcelas mixtas, próximas a los cursos fluviales pero con escaso recubrimiento vegetal y mayor influencia del suelo (fluvisoles y suelos afectados por procesos de gleyzación) tiene valo-

res bajos en todos los canales, incluidos los térmicos debido también a su alto contenido en humedad. Los núcleos urbanos tienen la curva característica de las áreas edificadas: valores relativamente bajos en las bandas visibles e infrarrojos próximos y medios y temperaturas también relativamente bajas a estas horas de la mañana, debido a las sombras y a la inercia térmica de los materiales.

Así, pues, de estos datos se deduce que con los números digitales obtenidos por el sensor, es posible discriminar con nitidez los suelos desarrollados sobre materiales yesíferos o margo-calcáreo-yesíferos, con una alta reflectancia. Dentro de ellos, aún es difícil delimitar con total fiabilidad los perfiles correspondientes sólo a gypsisoles, si bien la mayor parte de los suelos desarrollados en esta área, sobre este tipo de materiales, corresponden a estas unidades de suelos o a asociaciones de las que forman parte de manera significativa.

Con estas áreas de entrenamiento se ha efectuado una clasificación supervisada (Fig. 4b) en la que se observa una nítida discriminación en las parcelas próximas a los ríos, tanto en las de regadío como en las que tienen poca vegetación. Asimismo los núcleos urbanos e infraestructuras viarias quedan claramente delimitados. También se separan las áreas de gypsisoles y aquellas con desarrollo de otros perfiles (calcisoles, cambisoles, regosoles y leptosoles) sobre materiales margo-yesíferos, si bien en algunos casos puede haber confusión y sería necesario contrastar los resultados con los de sensores de mayor resolución espacial y con el trabajo de campo. Las áreas más erosionadas (tierras acarcavadas también conocidas como "badlands") también se distinguen bien, pudiéndose llegar a establecer una cartografía de las mismas y analizar su evolución. Gracias a la resolución temporal del sensor se podría analizar la velocidad de los procesos de acarcavamiento y el riesgo de erosión-degradación que existe para este tipo de suelos.

CONCLUSIONES

El sensor ETM+ del satélite Landsat 7 supone una ventaja para los estudios del medio físico a escala regional frente a otros satélites de la serie Landsat. Su mayor resolución espacial, en algunas bandas, permite trabajar con más detalle y facilita incluso la realización de estudios a nivel local.

Con este sensor se observan con nitidez, tanto visual como espectralmente, los materiales margo-yesíferos y calcáreos localizados, en la Comunidad de Madrid, en las proximidades de los ríos Tajo, Jarama y Tajuña.

Para estudios locales o regionales de climatología resulta mucho más eficaz que el sensor TM al contar con dos canales térmicos. Estos canales son similares a los del sensor AVHRR del programa NOAA por lo que se pueden comparar los datos.

Los canales que permiten identificar mejor los sedimentos margo-yesíferos son, individualmente, los pertenecientes al espectro visible. Las combinaciones entre bandas que mejores resultado han ofrecido en este estudio son: 3-2-1, 4-3-2, 5-2-1, 4-7-1, 7-5-4 y 5-7-3.

Entre las mejoras radiométricas destaca el índice mineral que combina los cocientes: 5/7, 5/4 y 3/1.

Al realizar una clasificación supervisada basada en el conocimiento de terreno y en los datos aportados por el sensor se facilita la delimitación de la distribución espacial de los gypsisoles, lo que facilitará su inclusión en un Sistema de Información Geográfica.

Asimismo se discriminan con nitidez las áreas más erosionadas y especialmente las sometidas a un intenso proceso de acarcavamiento, tanto sobre materiales terciarios como cuaternarios.

La información obtenida mediante las imágenes de satélite (color real, combinaciones en falso color, valores digitales de los diferentes materiales, etc.) se puede extrapolar a otras áreas con gypsisoles, de forma que

la cartografía de suelos se beneficie de la rapidez y precisión de esta técnica. Así, el tratamiento de imágenes ETM+, aunque no ofrece por sí solo resultados definitivos para la cartografía de suelos, sí es de gran utilidad en las fases inicial y final de los trabajos sobre geografía de suelos, al menos en lo que respecta a los gypsisoles, pudiéndose localizar áreas con una determinada unidad o asociación de suelos y áreas susceptibles de una mayor degradación física y antrópica.

REFERENCIAS

- Drury, S.A. (1987). *Image Interpretation in Geology*. Allen & Unwin. London.
- Duchaufour, P.H. (1977). *Atlas ecológico de los suelos del mundo*. Masson. Barcelona.
- FAO (1989). *Mapa mundial de suelos*. FAO. Roma.
- García, M.P.; Guerra, A.; Pérez, M.E. (en prensa). Study of a ring structure trough TM-sensor in Northern Somosierra (Spanish Central System). Aceptado para su publicación en *International Journal of Remote Sensing*; paper nº RES 100 761.
- García, M.P. y Muñoz, M.C. (1998). Utilización de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Cartografía de Suelos. *Edafología* 4, 95-105.
- García, M.P. y Pérez, M.E. (1999). Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo). *Revista de Teledetección* 11, 13-22.
- Goossens, R.; Rans, E. (1998). The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismailia province (Egypt). *Geoderma* 87, 47-56.
- Goossens, R.; Rans, E.; Ghabour, T.; Badawi, M. (1999). The use of remote sensing and Gis to detect gypsiferous soils in the Ismailia province, Egypt. *Operational remote sensing for sustainable develop-*

- ment. Procc. of the 18th EARSel Symposium, Enschede, Netherlands*, 11-14 May 1998, 97-102.
- Gumuzzio, J. y Álvarez, J.B. (1984). Características de gipsiorthids en la Región Central Española. *An. Edafol. y Agrobiol.* 43, 93-110.
- I.G.M.E. (1968). Mapa Geológico de España 1:50.000. Aranjuez, nº 605. Madrid
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Getafe, nº 582. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid.
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Arganda, nº 583. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Chinchón, nº 606. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid.
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Ocaña, nº 631. Seg. Serie. 1ª ed. Madrid.
- Koch, M. (2000). Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a case study in Los Monegros, NE Spain. *Intern. Jour. Remote Sensing* 21,457-473.
- Labrandero, J. L. y De Lera, O. (1988). Sensores MSS y TM en el análisis del paisaje del suelo. *Coloquio Hispano-francés sobre Teledetección y Planificación Integrada del territorio*. Madrid, mayo de 1988.
- Mulders, M.A. (1987). *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990a). *Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid*. Escala 1:200.000. 1ª ed. C.A.M.-C.S.I.C. Madrid.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990b). *Mapa de Capacidad Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid*. Escala 1:200.000. 1ª ed. C.A.M. - C.S.I.C. Madrid.
- Nieves, M. y Gómez, V. (1992). *Designación de los horizontes y capas del suelo. Evolución histórica y localización en la Comunidad de Madrid*. Monografías Agencia de Medio Ambiente. C.A.M. Madrid.
- Olmos, T. (1996). Panorama edáfico de la Comunidad de Madrid. *Tierra y Tecnología*; 25-31.
- Peinado, M. y Rivas-Martínez, S. (1987). *La vegetación de España*. Ed. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid, 544 p.
- Pérez, M.E. y García, M.P. (2001). Estudio de las bandas térmicas del sensor ETM+ en la Comunidad de Madrid y alrededores. En *El Tiempo y el Clima*, Pérez Cuevas, López Baeza y Tamayo Carmona (eds). Publ. de la Asoc. Esp. de Climatología ; serie A, nº 2, 499-508.
- Schmid, T.F., Gumuzzio, J. y Koch, M. (2000). Spectral and textural classification of multi-source imagery to identify soil degradation stages in semi-arid environments *Proceedings EUROPTO'00*, Barcelona, Spain, Septiembre 2000, 67-74.
- U.S.D.A. (1999). *Soil Taxonomy*. U.S.D.A. Handbook, nº 436. 2ª ed. Washington; 869 pp.