

Diferenciación de unidades edáficas en base a imágenes 1M

P. Siljeström, A. Moreno, L.V. García Fernández, y L. Clemente.
*Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. C.S.I.C.
Apdo. 1052. 41080 Sevilla.*

RESUMEN

Se aplica el análisis digital de una imagen TM en la discriminación de unidades edáficas a través de la caracterización de la vegetación e hidromorfía del suelo.

Se utiliza una subescena de una imagen del Parque Nacional de Doñana (SW España), correspondiente al mes de junio de 1984. Se usan las bandas 3, 4 y 7 por concentrar la mayor información y se efectúan las razones 7/4 y 4/3. Las unidades obtenidas mediante el análisis de estos canales y razones se comparan con las determinadas «in situ», evaluándose la utilidad de dicha metodología en el estudio del suelo.

PALABRAS CLAVE: Doñana, suelos, vegetación, Thematic Mapper (TM), razones entre bandas.

ABSTRACT

The present paper deals with the applicability of the digital analysis of a satellite image in the soil differentiation. The studied image corresponds to a subscene of SW Spain (Doñana National Park), taken in June, 1984. Bands 3, 4 and 7 have been chosen for this study, as well as their ratios (7/4 and 4/3). These processes permitted the differentiation of several units, based on their vegetation and soil moisture. These units, corresponding to different soil types, were afterwards compared with the ones obtained using another methodology and «in situ» observations.

KEY WORDS: Doñana, soils, vegetation, Thematic Mapper (TM), band ratios.

INTRODUCCIÓN

La zona estudiada se sitúa dentro del Parque Nacional de Doñana, ubicado en la margen derecha de la desembocadura del río Guadalquivir (SW España).

El clima es de tipo mediterráneo, clasificado como seco subhúmedo con exceso de agua en invierno (Thorntwaite, 1948).

Desde el punto de vista textural, en las imágenes TM pueden distinguirse dentro del Parque dos grandes zonas. La primera comprende las arenas eólicas holocenas que, por su dinámica, pueden dividirse en arenas estabilizadas y dunas móviles (Fig.1)(Siljeström y Clemente, 1987a; Clemente et al, 1993). La segunda, corresponde a los sedimentos aluviales limo arcillosos que rellenaron el antiguo estuario del Guadalquivir para formar las actuales marismas (Menanteau, 1981; García Fernández, 1993).

A grandes rasgos pueden, por tanto, distinguirse tres ecosistemas claramente diferenciados (dunas móviles, arenas estabilizadas y marisma) que presentan un gran dinamismo, especialmente en las zonas de contacto, diferenciándose otros dos ecosistemas (lagunas permanentes, entre las arenas móviles y las estabilizadas, y vera, entre éstas últimas y la marisma).

Se ha escogido una subescena de 512 por 512 pixels (unos 15x15 km), que incluye los cinco ecosistemas antes citados (Fig. 1).

MATERIAL Y MÉTODOS

La imagen estudiada fue captada en junio de 1984 por el sensor Thematic Mapper a bordo del Landsat-5. Dicha imagen se procesó en un equipo Intergraph, con software ISI-2. El estudio de los histogramas de las siete bandas, así como el análisis de correlación han mostrado que las bandas óptimas son las 3, 4 y 7 (Fig.1), ya que concentran la mayor cantidad de información (Wood y Beck, 1986; Hardisky et al, 1984; Siljeström et al, 1993b).

Por otro lado, se emplean las razones 7/4 y 4/3 (Fig.2), por ser las que realzan mejor las características espectrales de la humedad y vegetación imprescindibles, en éste caso, para definir unidades edáficas.

El componente atmosférico (ruido), que tiene carácter aditivo y depende de la longitud de onda (Kowalik et al, 1983), se ha eliminado con el método de ajuste al valor mínimo (Chávez et al, 1977; Chuvieco, 1990) para obtener una mayor fiabilidad en el resultado (Crippen, 1988; Crippen et al, 1988). En cualquier caso, las imágenes derivadas de razones deben considerarse complementarias de las originales, ya que en ellas existe una pérdida potencial de información derivada de la posibilidad de obtener iguales cocientes de razones distintas. Esta circunstancia podría favorecer que diferentes materiales presenten un mismo valor de reflectan-

cia en la imagen resultante, además de perderse la información topográfica (Crippen et al, 1988).

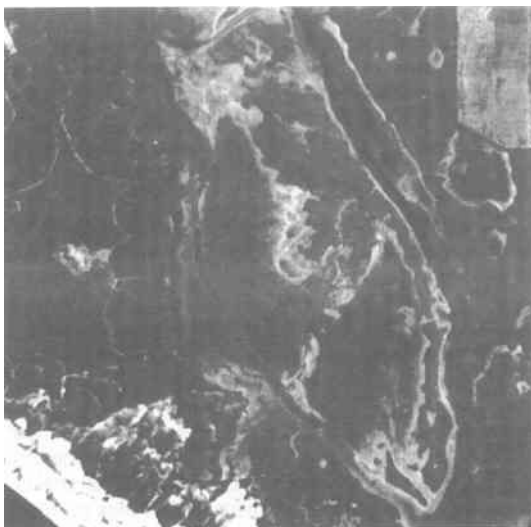


Figura 1a. Bandas TM originales: 3



Figura 1.b. Bandas TM originales: 4



Figura 1.c. Bandas TM originales: 7

Dada la general dificultad de la caracterización de unidades edáficas (Satterwhite y Henley, 1987), que en algunos ecosistemas pueden llegar a ser de extensión muy reducida a partir de pixels de resolución 30 por 30 m, se plantea un método alternativo. Este método se basa en la estrecha relación que existe en éste área natural conservada entre la geomorfología, vegetación y suelos (Siljeström, 1985; Siljeström et al, 1993a). Por tanto, reconociendo los dos primeros, puede predecirse con pequeño margen de error, el tercero.

Finalmente, la vegetación se describe (salvo excepciones) en asociaciones, siguiendo el estudio realizado por Rivas Martínez et al, 1980.

DISCUSIÓN

El primer ecosistema estudiado, las *dunas móviles* se sitúa al SW del Parque, formando una franja paralela al litoral, con una anchura máxima de 4 km. Este sistema está constituido por varios frentes dunares bien definidos, de altura y velocidad variables, que avanzan en dirección SW-NE (viento dominante). Alternando con los frentes dunares, aparecen valles con fondo plano y húmedo que corresponde al nivel freático del conjunto, y se denominan localmente corrales (Chapman, 1976). Estas dos situaciones (frentes dunares y corrales) constituyen las dos unidades geomorfológicas, de vegetación y, por tanto edáficas, del sistema.

Los frentes dunares se reconocen claramente en las tres bandas standard estudiadas (3, 4 y 7) (Fig.1) por la gran reflectividad de las arenas, que aparecen en los tres casos de color blanco.

Las dunas están formadas por arenas de naturaleza fundamentalmente cuarcítica (Apcarián 1983), cuya movilidad (hasta 5 m/año en algunos enclaves) impide el asentamiento de la vegetación y el desarrollo edáfico.

Las razones realizadas no ofrecen información adicional, ya que suprimen la topografía, eliminando así la principal característica de la unidad.

La segunda unidad que compone este ecosistema, los corrales, se corresponde con los valles interdunares del conjunto y están caracterizados por poseer hidromorfía y cobertura vegetal variable. Estas características se reflejan en los diferentes tonos oscuros que aparecen en las tres bandas simples y razón 7/4, y en los tonos claros y brillantes de la imagen 4/3 (Fig.2).

Las tres bandas standard permiten una diferenciación morfológica de los corrales del sistema, apreciándose una progresiva estabilización y evolución a medida que se alejan del mar, que se refleja en el aumento gradual de su superficie, de la humedad y densidad de la cobertura vegetal. En las imágenes correspondientes a las razones 7/4 y 4/3 puede observarse, además de las características anteriormente mencionadas, diferencias en la vege-

tación (pinar-matorral-pastizal), cuando se trata de corrales suficientemente desarrollados.



Figura 2.a. Razones entre bandas: 7/4

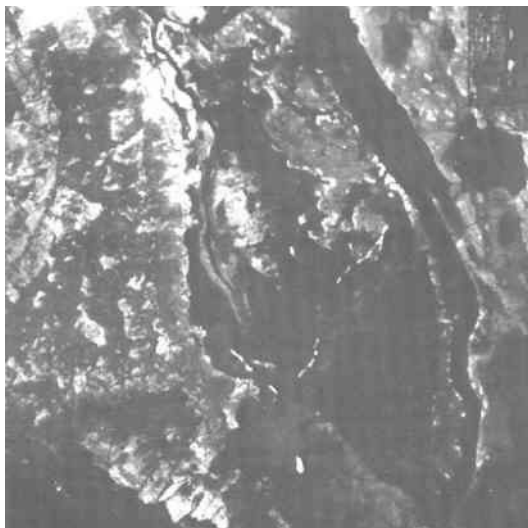


Figura 2.b. Razones entre bandas: 4/3

En los corrales cercanos al mar, morfológicamente menos desarrollados debido a su gran inestabilidad, la morfológica de los corrales del sistema, apreciándose una progresiva estabilización y evolución a medida que se alejan del mar, que se refleja en el aumento gradual de su superficie, de la humedad y densidad de la cobertura vegetal. En las imágenes correspondientes a las razones 7/4 y 4/3 puede observarse, además de las características anteriormente mencionadas, diferencias en la vegetación (pinar-matorral-pastizal), cuando se trata de corrales suficientemente desarrollados.

En los corrales cercanos al mar, morfológicamente menos desarrollados debido a su gran inestabilidad, la vegetación pionera, de escasa cobertura (asociación *Euphorbio-Agrophyretum junceiformis*) es prácticamente inapreciable. Tan sólo en la

imagen 4/3 aparecen pequeñas manchas en tonos gris medio, correspondientes a éstas situaciones. La inestabilidad de éstos corrales, no permite la evolución edáfica, por lo que el suelo apenas alcanza el desarrollo de un *Typic Xeropsamment* (USDA-SMSS, 1985).

En la imagen 7/4, el corral más interno muestra un fondo amplio donde se aprecian bandas estrechas, paralelas a la línea del frente aunar precedente, semejantes a la formación «Gusanos» (Siljeström y Clemente, 1990), que corresponden a pequeñas elevaciones del terreno estrechamente relacionadas con la fluctuación estacional del nivel freático y la dinámica del conjunto. En dicha imagen, el tono oscuro de este corral indica su mayor hidromorfía, mientras que los tonos claros que aparecen en la imagen 4/3 indican una densa cobertura vegetal verde, fotosintéticamente activa. Esta vegetación está compuesta por un bosque de *Pinus pinea* L., acompañado por un matorral más o menos ralo compuesto por las especies *Halimium halimifolium* (L.) Willk, *Ulex minor* Roth, *Mentha pulegium* L., etc, que en las zonas más deprimidas deja paso a la asociación *Holoshoen-Juncetum acuti*.

La cobertura vegetal y la hidromorfía permiten la evolución del suelo hacia un *Typic Psammaquent*, que en situaciones más favorables tiende hacia un *Typic Haplaquoll*.

En resumen, el sistema de dunas móviles depende del reconocimiento en las imágenes de los parámetros que se recogen en el siguiente cuadro:

- 1 - diferenciación de unidades geomorfológicas
 $3 = 4 = 7 \gg 7/4 = 4/3$
- 2 - contenido en humedad en los corrales
 $7/4 > 4 > 3 > 7 > 4/3$
- 3 - densidad y actividad de la cobertura vegetal
 $4/3 > 7/4 > 4 > 7 > 3$

Limitando con las arenas estabilizadas, situadas al norte de las dunas móviles, se encuentra el ecosistema constituido por las lagunas permanentes (Siljeström & Clemente, 1987b). Estas lagunas, de extensión variable, mantienen el agua todo el año, ya que ésta proviene de la descarga de los acuíferos del sistema de dunas móviles por la base de sus frentes de avance (García Novo et al, 1975), a la que se une el agua de lluvia procedente del drenaje de las arenas estabilizadas (Toja y Furest, 1981).

Estas lagunas tienen aguas someras con abundante materia orgánica en suspensión y bordes higroturbosos. A pesar de estar muy próximas entre sí, sus aguas presentan diferencias en la composición química (Vela, 1984), en el fitoplancton (Margalef, 1976; Saéz Jimenez, 1992) y en el zooplancton (Armengol, 1976).

Cuando se observan las imágenes 7/4 y 4/3, la laguna más extensa (Sta. Olalla) presenta características muy diferentes de las demás, que aparecen

iguales entre sí. En efecto, en la primera (7/4), dicha laguna es la única con contorno definido y aguas en tonos oscuros, indicando una reflectancia mucho más alta en la banda 4 que en la 7. Por el contrario, las otras lagunas aparecen en tono gris medio, lo que significa valores semejantes en las dos bandas. La razón de esta diferencia es la enorme proliferación que se produce en los meses de verano del alga *Spirulina platensis*, que aparece en un cultivo prácticamente puro (Saiz Jiménez, 1992). Esto hace que el agua adopte color verde frente a la transparencia que mantienen las demás lagunas. Este hecho, provocaría una mayor reflectancia en la banda 4 que en la 7, donde la absorción es total.

En la segunda imagen (4/3), también se aprecia esta diferencia, aunque no de forma tan clara. En este caso, la laguna Sta. Olalla es la única que aparece con contorno difuso frente a las otras, que presentan aguas en tonos oscuros y bien delimitadas. De esto se deduce que, mientras en la laguna Sta. Olalla los valores de reflectividad del agua en la banda 3 son sólo ligeramente mayores que en la banda 4 (debido a la clorofila del alga *Spirulina*), en las otras lagunas la transparencia del agua hace que la radiación en el infrarrojo cercano (banda 4) sea absorbida, creando una gran diferencia entre los valores de ambas bandas.

Rodeando la superficie de agua libre puede reconocerse una orla de influencia de la humedad, colonizada por un matorral denso (asociación *Erico-Ulicetum australis*) que pasa a pastizal (asociación *Trifolio-Caricetum chaetophyllae*). La densidad de la vegetación y la humedad persistente condiciona la evolución edáfica hacia un *Typic Humaquept* como suelo más representativo (Siljeström y Clemente, 1987b). Por tanto, la técnica de teledetección muestra interés no sólo en el estudio de la calidad del agua sino también, por extrapolación a partir de una zona conocida, en la definición muy aproximada de las características edáficas.

Como resumen, en el siguiente cuadro se recoge la importancia de las diferentes bandas y razones en el estudio de éste ecosistema:

- 1 - diferenciación de unidades geomorfológicas (delineación de las lagunas)
 $4 = 7 > 4/3 > 7/4 > 3$
- 2 - calidad del agua de las lagunas
 $7/4 > 4/3 >> 7 = 4 = 3$

Las arenas estabilizadas forman un gran ecosistema situado en la mitad W-NW de la imagen. El relieve está formado por vestigios de antiguos frentes dunares, parcial ó totalmente arrasados por la deflación y erosionados por el drenaje (Vanney

y Menanteau, 1979). El resultado es un manto arenoso donde apenas se distinguen las antiguas formas, muy relacionadas con la altura del nivel freático, que se muestran a través de la cobertura vegetal. En éste ecosistema, el más antiguo de todos, la evolución edáfica está condicionada básicamente por dos procesos: hidromorfia y acumulación de materia orgánica (Clemente et al, 1988a, 1988b). El primero, se observa con claridad en la imagen 7/4, donde las zonas más elevadas (antiguas crestas dunares) y por tanto menos hidromorfas muestran un tono más claro debido a los mayores valores de reflectancia de la banda 7 respecto a la 4. En efecto, la escasa vegetación (matorral ralo representado por la asociación *Halimio - Staurocanthetum genistoidis*) ofrece bajos valores de reflectancia en la banda 4 mientras que la relativa hidromorfia del suelo (nivel freático entre 1-1.5 m) muestra valores comparativamente más altos en la banda 7. Estas zonas tienen unos suelos poco evolucionados, clasificados como *Dystric Xeropsamments* ó *Aquic Dystric Xeropsamments* (Siljeström, 1985).

Por otro lado, las zonas más deprimidas e hidromorfas aparecen en tonos más oscuros indicando unos valores elevados en la banda 4, debido a la gran densidad de vegetación, representada por la asociación de matorral *Erico scopariae-Ulicetum australis*, frente a los bajos valores de la banda 7 gracias a la total absorción de ésta por el agua presente en el suelo. Dichos suelos, por la fuerte hidromorfia, pueden clasificarse como *Humaqueptic Psammaquents*. Entre éstas áreas, algunas antiguas y bien conservadas, representan la etapa climácica del ecosistema de bosque en Doñana, constituido por megafanerófitos higrófilos y nanofanerófitas y hemicroptófitas de apetencias esciófilas (asociaciones *Oleo-Quercetum suberis* y *Lonicero hispánica-Rubus ulmifolii*). Los suelos, muy evolucionados, se clasifican como *Typic* ó *Histic Humaquept*, (Siljeström, 1985).

Asimismo, las zonas elevadas y deprimidas se separan claramente en la imagen de la razón 4/3, ya que sirve, en una primera aproximación, como índice de vegetación. Las áreas más elevadas aparecen en tonos más oscuros (valores en $3 > 4$), ya que la banda 4, cuyos valores reflejan el agua intracelular y la estructura del tejido esponjoso del mesófilo de la hoja (National Academy of Sciences, 1970) presenta valores bajos si la vegetación es rala. Dichos valores aumentan con la mayor densidad de la cobertura vegetal en las zonas deprimidas e hidromorfas, por lo que éstas adoptan un tono gris muy claro e incluso blanco (valores en $4 >> 3$) por otro lado, la banda 3 que se caracteriza por su fuerte absorción en el rojo por la clorofila, presentará valores más bajos cuanto más densa sea la vegetación, siempre que esté sana y fotosintéti-

camente activa, por lo que refuerza la afirmación anterior.

Por todo ello, la caracterización de las unidades edáficas en el ecosistema de arenas estabilizadas puede establecerse con gran fiabilidad a través del reconocimiento de los siguientes parámetros:

- 1 - *delimitación de unidades geomorfológicas*
7/4 > 4/3 > 7 > 4 > 3
- 2 - *contenido en humedad del suelo*
7/4 > 4/3 >> 7 > 4 > 3
- 3 - *densidad y actividad de la cobertura vegetal*
4/3 >> 4 > 7/4 > 7 > 3

Marcando la transición entre dos ecosistemas tan diferentes como son las arenas estabilizadas con suelos arenosos oligotrofos y la marisma con suelos arcillosos y salinos sujetos a encharcamiento, aparece un tercer ecosistema muy particular, denominado *vera* (Allier y Bresset, 1977).

La vera ocupa una franja estrecha y larga, de dirección aproximada N-S, con una anchura que puede variar entre 200 y 1500 m, en cuyo espacio el nivel topográfico baja 2 ó 3 m. El límite exacto entre las arenas y la marisma aparece muy difícil de discernir por su gran dinámica, estando formado por numerosas interdigitaciones tanto horizontales como verticales (Mudarra et al, 1984).

La vegetación que coloniza este ecotono está definida por un helechal de apetencias esciófilas en la parte más arenosa, que evoluciona hacia un mosaico de pastizales eutróficos (asociación *Centaureo exaratae-Armerietum gaditanae*. Allier y Bresset, 1977 corr.) y juncuales distróficos (asociación *Holoshoen-Juncetum acuti*). El aumento de humedad, la alcalinización del sustrato y el cambio textural que se producen hacia la marisma favorecen la aparición de especies terofíticas (asociación *Trifolium resupinatum-Caricetum chaetophyllae*) que, por su condición de efímeras y migradoras se adaptan a éste ecosistema, que fluctúa cada año según el régimen de lluvias y crecidas. Este área, por el gran dinamismo espacio temporal que presenta, tiene una enorme variabilidad edáfica (Siljeström y Clemente, 1987c), difícilmente discernible por teledetección.

En la imagen 4/3 se aprecia la gran cantidad de pastizales que aparecen en forma de manchas blancas en el área superior de la imagen, la más productiva de todo el Parque. Por otro lado, en la imagen 7/4 se refleja la hidromorfia, permitiendo separar las arenas de las marismas ya que la vera constituye el área de descarga del acuífero dunar, así como el del sistema Almonte-Marismas (MOPU, 1979; Yagüe y Llamas, 1984). En dicha imagen aparecen las zonas de afloramiento del nivel freático en tonos oscuros ó incluso negros,

por la absorción total que caracteriza al agua en la banda 7.

Puede afirmarse, por tanto, que la utilidad de la teledetección en el estudio de la vera se centra en las características siguientes:

- 1 - *contenido en humedad y encharcamiento del suelo*
7/4 > 4/3 > 7 >> 4 > 3
- 2 - *densidad y actividad de la cobertura vegetal*
4/3 > 7/4 >> 7 > 4 > 3

Finalmente, *la marisma* constituye el ecosistema más extenso dentro del Parque Nacional de Doñana (aprox. 270 km²). Este ecosistema aparece como una inmensa planicie con morfología típica de llanura de inundación. La mayor parte presenta una cota inferior a 2 m sobre el cero geográfico (superándose excepcionalmente los 3 m) y con una pendiente media inferior al 0.1 por mil.

A pesar de la gran uniformidad del terreno, pueden distinguirse pequeños accidentes topográficos que originan desniveles decimétricos, capaces de condicionar la hidrología y cobertura vegetal. En éste sistema, la evolución edáfica aparece condicionada por el tiempo de encharcamiento y la salinidad, estando ambos factores muy relacionados entre sí y con la topografía. Por ello, haciendo una buena separación de las formas del terreno en función a sus cotas, puede obtenerse una estimación muy aproximada de los suelos presentes en cada unidad (Siljeström et al, 1989).

En una toposecuencia se distinguen las siguientes unidades: bancos, zonas de transición y depresiones (García, 1993).

Los bancos corresponden a áreas de cotas comprendidas entre 1 y 3 m, con una probabilidad de inundación muy baja (periodo de retorno de 10 a 20 años, en los más elevados). Están constituidos por materiales de textura más gruesa que los suelos circundantes, como consecuencia de su origen por desbordamiento de los caños durante las grandes avenidas. Estas zonas están cubiertas por un pastizal no muy denso, representado por las asociaciones *Hainardio-Lophlochoetum hispidae e Inulo-Arthrocnemetum glauci*. Todos estos factores favorecen la evolución del suelo hacia un *Fluvaquentis Xerochrept* (García, 1993).

Las zonas de transición (entre 1 y 0.1 m) corresponden a áreas de pendiente muy suave, con periodo de inundación somera de 1 a 5 meses y una microtopografía irregular, asociada a un fenómeno de gilgai como consecuencia de la alternancia de humectación/deseccación de las arcillas del suelo. Este, de carácter salino, se clasifica como *Aquollic Salorthid* (García, 1993) y está colonizado por un juncal representado por la asociación *Arthrocnemo-Juncetum subulati*.

Las depresiones, por último, corresponden a zonas de cotas comprendidas entre 0.7 y 0.2 m. Presentan un perfil plano-cóncavo, que permite el

establecimiento de una lámina de agua desde finales de otoño a principios de verano. De hecho, en la imagen estudiada, tomada en junio, son las únicas zonas que aparecen encharcadas. En función de su morfología y dinámica, ésta unidad se diferencia en lucios y caños. Los lucios tienen morfología lagunar y dimensiones variables. Su dinámica es la típica de laguna pluvial temporal en clima semiárido, comportándose como sumideros de solutos y sedimentos, lo que favorece su progresiva colmatación y salinización. Los suelos son fuertemente salinos, clasificándose como *Typic Salorthids* (García, 1993). Los caños presentan una morfología fluvial sinuosa, de dirección N-S. Tienen su origen en los colectores de las aguas de zonas situadas más al norte, que contribuían de forma notable a la inundación de la marisma. La canalización y desvío de dichas aguas ha favorecido un comportamiento similar al de los lucios, viéndose asimismo afectados por procesos de colmatación y salinización. Los suelos, más ricos en materia orgánica, presentan una evolución semejante a los de los lucios, clasificándose como *Aquollic Salorthids* (García, 1993). La vegetación sólo es significativa, tanto en lucios como en caños, en las orillas, y corresponde a una comunidad halofita densa correspondiente a la asociación *Scirpetum compacto-littoralis* acompañada por la asociación *Ruppium drepanensis*. Como se ha comentado anteriormente, además de la naturaleza del sustrato, es la topografía el principal factor condicionante de la evolución edáfica. Teniendo en cuenta que la imagen fue tomada en la época seca, únicamente los lucios y caños aparecen con lámina de agua libre. La delineación de éstas zonas aparece muy clara en la banda 7, debido a la total absorción que el agua presenta en este segmento del espectro. Por tanto, esta banda permite la separación nítida entre zonas anegadas (color negro) y emergidas (tonos grises). Sin embargo, no es fácil discernir en ésta banda las zonas de transición y los bancos, ya que cabría esperar tonos oscuros para las primeras y claros para las segundas, siendo la realidad al contrario. Por otro lado, la banda 4, por su absorción parcial del agua, no permite una buena delineación de las zonas encharcadas, aunque sí muestra los gradientes de humedad, confundiendo el borde de los cuerpos de agua. Por este motivo, la banda 4 permite la diferenciación de las zonas de transición (gris oscuro) y los bancos (gris más claro).

La banda 3, por otro lado, puede penetrar en el agua hasta una profundidad que depende de su transparencia, pero sin sobrepasar en ningún caso los 2 m (Avery y Berlin, 1985; Drury, 1986). El tono claro con que aparecen los lucios sin vegetación, así como los bordes de caños y lucios se puede atribuir a su gran turbidez por cargas de sedimentos finos (Tenajas, 1984), o bien a costras de sales en el caso que el suelo se encuentre ya

seco. Esta banda, por la gran absorción que en ella presenta la clorofila, suele utilizarse para discriminar diferentes tipos de vegetación, así como su estado vegetativo (Chuvieco, 1990). Dado que la imagen es de junio y gran parte de la vegetación se está comenzando a marchitar, los tonos oscuros deberán referirse al contenido en humedad del suelo. Esta hipótesis se corresponde con los tonos, asimismo oscuros, de la banda 4, que reflejan un cierto contenido en humedad frente a una degradada estructura celular de la vegetación (Elvidge, 1990; Drake, 1976).

En la imagen 7/4 aparecen muy bien discriminadas las zonas con agua en su superficie por la diferente absorción de ambas bandas (en la 7 el agua presenta valor 0, mientras que en la 4 hay una mínima reflexión). Por otro lado, el gradiente de humedad y la mayor reflectividad de la vegetación sana de los bancos y zonas de transición hace que los primeros aparezcan en tonos gris oscuro (mayor diferencia relativa entre las dos bandas, $4 \gg 7$), y las segundas en tono gris medio, bordeando e interdigitándose con los bancos.

La vegetación de dichos bancos y zonas de transición presenta una mayor reflexión que la correspondiente a las zonas bajas, debido a que está constituida por plantas xerófitas suculentas (Gates et al, 1965), frente a los grandes helófitos de los bajos, que se renuevan cada año. El hecho que la banda 7 presente valores elevados (sustrato seco) en la parte central de la imagen, y la vegetación esté bastante seca y degradada (valores muy bajos en la banda 4), provoca la aparición del color blanco brillante en ésta zona de la imagen 7/4 ($7 \gg 4$).

La razón 4/3, debido a la diferente penetrabilidad que presentan ambas bandas en el agua, permite diferenciar no sólo las superficies con agua libre (absorción casi total en banda 4), sino separar áreas en función del contenido de humedad del suelo. Las zonas más claras y brillantes indican la presencia de vegetación sana y fotosintéticamente activa (la banda 3 presenta bajos valores debido a una buena absorción por la clorofila frente a los altos valores de la banda 4 que reflejan una buena estructura celular) (Huete y Jackson, 1987).

A medida que los tonos se van oscureciendo, los valores de la banda 3 van aumentando respecto a la 4, por lo que se está reflejando el contenido en humedad del suelo. En efecto, en esta imagen pueden diferenciarse claramente las zonas más elevadas (bancos) de las de transición, mientras que las anegadas no pueden delimitarse, por la pequeña diferencia de valores de reflectancia que presentan ambas bandas (Escadafal et al, 1989).

En la marisma, por todo lo dicho anteriormente, es posible realizar una buena diferenciación en unidades morfoedáficas (Hardisky et al, 1986; Crouse, 1987), gracias a la estrecha relación que éstas presentan con el contenido en humedad del

suelo, así como a su gran extensión, ambos factores claramente identificables a partir de las imágenes estudiadas. Por tanto, para la caracterización edáfica de este ecosistema, los principales factores reconocibles a partir de las imágenes estudiadas se resumen del modo siguiente:

- 1 - *delimitación de zonas encharcadas*
7/4 > 7 » 4/3 > 4 > 3
- 2 - *contenido en humedad del suelo*
4/3 > 4 > 7/4 > 7 > 3
- 3 - *Tipo de vegetación y situación vegetativa de ésta*
4/3 > 7/4 > 7 > 3 > 4

CONCLUSIONES

Se utilizan las bandas 3, 4 y 7, así como las razones 4/3 y 7/4 de una imagen TM tomada en junio de 1984 de la parte central del Parque Nacional de Doñana para separar los principales ecosistemas. Estos, previamente reconocidos sobre el terreno, son cinco: dunas móviles, lagunas permanentes, arenas estabilizadas, vera y marisma.

En el sistema de dunas móviles, la banda 7 ha mostrado ser la más significativa, ya que ofrece información sobre su dinámica, mostrando las estructuras que adoptan los frentes de avance. Asimismo, ofrece una buena diferenciación de los corrales, mientras que la densidad y actividad de su cobertura vegetal aparece mejor representada en la razón 4/3, que funciona como índice de vegetación (Huete y Jackson, 1987). La evolución edáfica queda restringida al área de corrales en función, principalmente, de la hidromorfia, por lo que los suelos pueden ser calificados con gran fiabilidad.

En el ecosistema de lagunas permanentes, la técnica del análisis de imágenes permite determinar la superficie de agua libre (bandas simples) y su calidad (razón entre bandas), así como delimitar la zona de influencia de la humedad. Esta característica favorece una densa vegetación, que marcará el área de desarrollo edáfico más avanzado.

Dentro de las arenas estabilizadas, el reconocimiento de las unidades de suelo se efectúa en función de la densidad de la cobertura vegetal, directamente relacionada con la hidromorfia y formas del terreno que, por tanto, marcan los principales procesos edáficos. Estas características se aprecian en las imágenes 4/3 (que funciona como índice de vegetación) y en la 7/4 (índice de hidromorfia). Las unidades edáficas, aunque complejas, son lo suficientemente extensas para ser estudiadas por teledetección.

La vera, como ecosistema de transición entre las arenas y la marisma, presenta grandes problemas en la diferenciación de sus suelos, debido a que la resolución espacial del sensor no puede captar toda su variación. A pesar de todo, la imagen 4/3 ofrece información sobre la densidad y estado de la cobertura vegetal de la zona más productiva del Parque. Por otro lado, la imagen 7/4 muestra la

que. Por otro lado, la imagen 7/4 muestra la hidromorfia de este área, que por ser zona de descarga de acuíferos presenta gran interés hidrológico.

Finalmente, la marisma, unidad extensa de geomorfología plana, presenta una evolución edáfica en función del tiempo de inundación y salinidad, ambos dependientes de su microtopografía. Las zonas anegadas aparecen bien delimitadas en la banda 7 y en la imagen 7/4, mientras que la banda 3, por su fuerte absorción por la humedad, así como por la clorofila, ofrece información sobre el estado del suelo y la presencia ó ausencia de vegetación. Por último, la banda 4, que muestra el estado de la estructura celular vegetal, da buena idea sobre el grado de marchitez de las diversas comunidades vegetales. En este ecosistema, la separación de unidades edáficas es clara, debido a su gran extensión y homogeneidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLIER, C. & BRESSET, V. (1977). «Etude phytosociologique de la marisma et de sa bordure. Reserva Biologique de Doñana. Carte Phytosociologique». Madrid. Edit. ICONA, *Monografía 18*: 59-110.
- APCARIAN, A. (1983). «Evolución geomorfológica y edafológica de las arenas móviles del Parque Nacional de Doñana (España), *Monografía*, Sevilla. CEBAC-CSIC, 100 pp.
- ARMENGOL, J. (1976). «Crustáceos acuáticos del Coto de Doñana» *Oecol. Aquatica*, 2: 23 pp.
- AVERY, T.E. y BERLIN, G.L. (1985). «*Interpretation of Aerial Photographs*», Burgess Publ.Co., 555 pp.
- CLEMENTE, L.; SILJESTRÖM, P. y GARCÍA FERNANDEZ, L.V. (1988a). «Les facteurs ecologiques de la pedogenese dans la Reserve Biologique de Doñana (Espagne), *Cahier ORSTOM, Serie Pedologie*, vol XXIV, 2: 123-135.
- CLEMENTE, L.; SILJESTRÖM, P. y GARCÍA FERNANDEZ, L.V. (1988b). «Influencia del nivel freático en la evolución de suelos arenosos», en *Proceedings I International Symposium on Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions*, Sevilla, 49-53.
- CLEMENTE, L.; SILJESTRÖM, P. y GARCÍA FERNANDEZ, L.V. (1993). «Evolución geodáfica del sistema eólico del Parque Nacional de Doñana», *Cuaternario y Geomorfología* (en prensa).
- CRIPPEN, R.E. (1988). «The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing», *Int. Journal of Remote Sensing*, vol 9, 4: 749-765.
- CRIPPEN, R.E.; BLOM, R.G. y HEYADA, J.R. (1988). «Directed band ratioing for fue retention of perceptually independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery», *Int. Journal of Remote Sensing*, vol 9, 4: 749- 765.
- CHAPMAN, V.J. (1976). *Coastal Vegetariano* Pergamon, Oxford.
- CHAVEZ, P.S.Jr.; BERLIN, G.L. y ACOSTA, A.V. (1977). «Computer processing of Landsat MSS digital data for linear enhancements», en *Proceedings II T. Pecara Memorial Symposium*. Falls Church, American Society of Photogrammetry, 235-250.

- CHUVIECO, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid. Rialp, 453pp.
- DRAKE, B.G. (1976). «Seasonal changes in reflectance and standing crop biomass in three salt marsh communities», *Plant Physiology*, 58: 696-699.
- Drury, S.A. (1986). *Image Interpretation in Geology*, Allen & Unwin, 243 pp.
- EL VIDGE, C.D. (1990). «Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials», *Int. Journal of Remote Sensing*, vol 11, 10: 1775-1795.
- ESCADAFAL, R.; GIRARO, M.C. y COURAULT, D. (1989). «Munsell Soil Color and Soil Reflectance in the Visible Spectral Bands of Landsat MSS and TM data», *Remote Sensing of Environment*, 27: 37-46.
- GARCIA FERNANDEZ, L.V. (1993). Tesis doctoral. Universidad de Sevilla (en preparación).
- GARCIA NOVO, F.; RAMÍREZ, L. y TORRES, A. (1975). «El sistema de dunas de Doñana», *Naturalia Hispanica* (ICONA), 5: 56 pp.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C. y WEIDNER, V.R. (1965). «Spectral properties of plants», *Applied Optics*, vol 4, 1: 11-20.
- HARDISKY, M.A.; DAIBER, F.C.; ROMAN, Ch.T. y KLEMAS, V. (1984). «Remote Sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of a salt marsh», *Remote Sensing of Environment*, 16: 91-106.
- HUETE, A.R. & JACKSON, R.D. (1987). «Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands», *Remote Sensing of Environment*, 23: 213-232.
- KOWALIK, W.S.; LYON, R.J.P. y SWITZER, P. (1983). «The effects of additive radiance terms on ratios of Landsat data», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 49, 5: 659-669.
- MARGALEF, R. (1976). «Algas de agua dulce de Doñana», *Oecol. Aquatica*, 2: 79 pp.
- MENANTEAU, L. (1981). *Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire récent.*, Tesis Doctoral, Univ. de Paris-Sorbona, 252 pp.
- MOPU (1979). *Informe hidrogeológico y de recursos hidráulicos, desagües y vertidos, y posibles incidencias de los mismos en el Parque Nacional de Doñana*, Madrid. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- MUDARRA, J.L., CLEMENTE, L. y SILJESTRÖM, P. (1984). «Hidromorfía en suelos del Orden Vertisol del valle del Guadalquivir», en *Actas I Congo Nac. Ciencia del Suelo*, Madrid, 655-667.
- NATIONAL ACADEMY OF THE SCIENCES (1970). *Remote Sensing, with special reference to agricultura and forestry*, Washington D.C. Agricultural Board, National Research Council, 424 pp.
- RIVAS MARTINEZ, S.; COSTA, M.; CASTROVIEJO, S. y VALDÉS, E. (1980). «Vegetación de Doñana (Huelva-España)», *Lazaroa*, 2: 5-190.
- SAIZ JIMÉNEZ, C. (1992). «Applications of pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry to the study of humic substances: evidence of aliphatic biopolymers in sedimentary and terrestrial humic acids», *The Science of the Total Environment*, 117/118: 13-25.
- SATTERWHITE, M.B. y HENLEY, J.P. (1987). «Spectral characteristics of selected soils and vegetation in northern Nevada and their discrimination using band ratio techniques», *Remote Sensing of Environment*, 23: 155-175.
- SILJESTRÖM, P. (1985). *Geomorfología y Edafogénesis de las Arenas del Parque Nacional de Doñana*, Tesis Doctoral, Univ. de Sevilla, 515 pp.