

Aplicaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo*

Emilio CHUVIECO SALINERO

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de ocupación del suelo tienen como misión fundamental la cartografía e inventario de la cobertura o utilización de un determinado espacio geográfico. Esta definición engloba dos concepciones distintas de este tipo de estudios, bien nítidas al menos en la literatura anglosajona. Por un lado, el de ocupación o cobertura del suelo (*land cover*), que designa los materiales que se presentan en un momento concreto sobre la superficie de la Tierra; por otro, el de utilización del suelo (*land use*), referido más a la actividad humana que se desarrolla en ese espacio. Categorías como encinar, praderas naturales o cultivos regados, se refieren más al primer concepto, mientras usos recreativos, ganaderos o comerciales, se enmarcan en el segundo (Cfr. Jensen, 1983).

Evidentemente cuando emprendemos estos estudios con apoyo de la Teledetección, en sus diversos sistemas, sólo podemos referirnos al primero de estos conceptos, ya que no podemos obtener información «a distancia» de actividades humanas no plasmadas en el paisaje, como sería el uso recreativo (caza, parques naturales), o comercial (en el interior de la ciudad).

Ahora bien, ambas concepciones se relacionan estrechamente. Es posible realizar un trabajo de campo riguroso para obtener la utilización real de un determinado espacio, sobre la cartografía de la cobertura vegetal y humana que presenta, haciéndose así ambos conceptos complementarios en la práctica.

* Conferencia pronunciada el 4 de julio de 1984 en el curso: «Teledetección y recursos naturales», organizado por el CEDEX. Texto revisado y ampliado.

El conocimiento del estado actual de la ocupación del suelo es de una particular importancia, pues expresa una situación de equilibrio en ese sistema dinámico de interacción hombre-medio. Junto a ese carácter 'ecológico', este tipo de estudios proporcionan al geógrafo —y a otros científicos con preocupación espacial— una valiosa herramienta para conocer el significado complejo de la región que estudian, poniéndolo en contacto con los variados factores medio ambientales y humanos que actúan en el paisaje (clima, morfología, suelos, paisaje agrario, poblamiento, etc.).

Por último, la cartografía de ocupación del suelo es instrumento básico de planificación territorial, pues es condición esencial conocer la situación presente para que puedan establecerse planes de modificación del espacio satisfactorios. Un mal inventario, defectuoso en su realización o simplemente desfasado cronológicamente, puede ocasionar decisiones negativas, con un carácter irreversible.

La calidad de este inventario depende en gran medida de la metodología empleada y de la fuente de información. Aquí nos centraremos principalmente en las aportaciones que la Teledetección espacial nos ofrece como punto de partida documental, y como instrumento metodológico, para este tipo de estudios.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los primeros acercamientos al estudio de la ocupación del suelo, parten de fuentes cartográficas y estadísticas como el Catastro o las Hojas de Cultivos, sujetas en muchos casos a imprecisiones en la definición de categorías, o en la catalogación y medición de superficies.

La fotografía aérea ofrece, en contrapartida, el estado real de ocupación, en una visión panorámica y sincrónica que nos permite identificar las clases de ocupación más importantes. Esa cualidad, junto a la visión estereoscópica, explica su profusa utilización para una amplia gama de estudios. Con apoyo de la fotografía aérea se han confeccionado en nuestro país los mapas de ocupación del suelo de Navarra (Ménsua y Soláns, 1965), Zaragoza (Ménsua, 1971) y Castellón (Sancho Comíns, 1979), entre otros, además de diversas zonas más restringidas que sirven de complemento a trabajos locales o sectoriales¹.

No obstante tan destacado papel, la fotografía aérea presenta algunos inconvenientes importantes que han hecho buscar nuevas alternati-

¹ Mención especial en estos trabajos merece el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España, realizado por el Ministerio de Agricultura (en fase de publicación) que podemos englobar como una categoría especial dentro de la cartografía de ocupación del suelo.

vas metodológicas. La débil cobertura espacial; el fatigoso tratamiento visual; los errores geométricos introducidos por la perspectiva cónica; y el complejo procedimiento de trasvasar la información al plano, son los principales problemas que presenta su aplicación. En definitiva, los costos económicos y de trabajo humano son considerables, produciéndose en la mayor parte de los casos un desfase considerable entre la fecha del vuelo y la publicación de los trabajos.

Estos inconvenientes explican la paulatina sustitución de este instrumento de trabajo por otras tecnologías más sofisticadas, que amplían el abanico de posibilidades para la realización de tales estudios.

3. EL EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL

El salto cualitativo hacia la utilización de nuevos sensores se dará a partir de 1972 con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS, verdadera clave en el desarrollo de las aplicaciones de esta tecnología en todo el mundo.

En el campo concreto de la ocupación del suelo, los satélites Landsat han proporcionado una fuente de información idónea para un gran número de inventarios de escala regional y nacional. Las principales ventajas del sistema para estos trabajos pueden esquematizarse como sigue:

a) Visión sinóptica de un amplia superficie del terreno, que asegura un gran volumen de información tomado en condiciones homogéneas. Se reducen, por tanto, las variaciones introducidas por el sensor para espacios regionales, al tratarse de una información calibrada y tomada por un sólo instrumento de observación.

b) Información concerniente a varias longitudes de onda, más allá del espectro visible. En concreto, el sensor multiespectral (MSS) de los primeros satélites Landsat, nos ofrece información de longitudes de onda no captables en la fotografía aérea convencional (infrarrojo cercano: 0,7-1,1 micras), muy útiles para discriminación de superficies vegetales.

c) Cobertura periódica y relativamente rápida. Las características orbitales de la serie nos permiten obtener información de la misma zona terrestre cada 18 días, lo cual beneficia enormemente los estudios diacrónicos. No hemos de olvidar que la ocupación del suelo es un elemento muy dinámico —especialmente en las áreas rururbanas— y es muy importante el seguimiento de estas alteraciones en busca de deducir hipótesis de desarrollo futuro.

d) Rapidez y economía de tratamiento. La conversión analógico-digital realizada por el satélite nos permite tratar los datos originales con apoyo del ordenador. Esto reduce la intervención humana, a la par

que agiliza el procesado de la información y reduce los costos². Todo ello hace posible la necesaria actualización de la cartografía, y la obtención del producto cartográfico en fecha no muy lejana al origen de la información³.

e) Versatilidad del tratamiento numérico. La manipulación digital de las imágenes nos permite realizar operaciones básicas muy costosas o inaccesibles a la interpretación visual, como serían las correcciones geométricas, filtrajes, combinación de bandas, cálculo de superficies, o la propia entrada de los resultados en un sistema de información geográfica.

En definitiva, «...las ventajas de una cobertura sinóptica y sincrónica de grandes regiones, con una repetición de imágenes relativamente rápida y posibilidad de ajustar geoméricamente la imagen a mapas topográficos convencionales, facilitan el uso de las imágenes Landsat para una gran gama de aplicaciones» (Schneider, 1980, pág. 85).

Testimonio de estas ventajas es la gran profusión de inventarios realizados en todo el mundo a partir de imágenes Landsat. Para EE.UU., por ejemplo, en 1981 se contabilizaba en 2 millones de millas cuadradas (aproximadamente un 60% del territorio nacional), la superficie inventariada con distintos sistemas de Teledetección, entre los que destaca el sensor MSS del Landsat (Cfr. Jensen, 1983). En los países europeos se han realizado inventarios piloto de áreas muy contrastadas: «La Loire» francesa (GDTA y CEE, 1982), el «Groos-Moos» suizo (Liechtenegger, 1981), el área urbana de Budapest (Istvan y Csaba, 1982), el sur de Italia (Justice y Townshend, 1981), Irlanda (Campbell, 1981), Suecia (Wastenson y otros, 1978), y un largo etcétera. Las referencias pueden ampliarse a los países en desarrollo, en donde la iniciativa estadounidense hacia Extremo Oriente y Sudamérica, principalmente, y la francesa hacia Africa, se han volcado en frutos de gran interés⁴.

² BALDRIDGE y otros (1975), evalúan en 171.000\$ el inventario de ocupación del suelo realizado en el Estado de Ohio mediante tratamiento digital de imágenes Landsat. Los costos del inventario anterior realizado con fotografía aérea diez años antes, ascendían a 191.000\$ (unos 310.000\$ de 1975). Respecto al tiempo de tratamiento se cifró en 9-12 meses en el primer caso, y 5 años en el segundo. En este sentido se manifiesta también Abiodun (1978).

³ Este tal vez sea uno de los aspectos más cruciales para un estudio de ocupación del suelo. Un inventario que se publique en fecha lejana a la de referencia se hace prácticamente inservible (en áreas dinámicas), perdiéndose de esta forma gran parte, al menos, de la validez original.

⁴ Tenemos noticias de trabajos de este tipo desarrollados en Filipinas, China, Tailandia, Nepal, la India, Indonesia, Brasil, Argentina, Perú, Venezuela, Chile, Panamá, Chad, Kenia y Argelia. No las incluimos aquí para no alargar excesivamente la lista de citas bibliográficas, si bien ilustran bien sobre el desarrollo a nivel mundial que ha adquirido esta tecnología.

En nuestro país, desgraciadamente, no se ha abierto aún una línea consolidada en este tipo de estudios. Tras los pioneros trabajos (pioneros no sólo en España, sino casi a nivel mundial) de E. Chicharro y J. L. Labrandero incluidos en un proyecto de investigación presentado a la NASA (Núñez de las Cuevas, 1976), sólo se registran intentos aislados, reflejo más bien de trabajos coyunturales que de una línea de investigación. En este capítulo, se incluiría el trabajo realizado sobre el Delta del Ebro (Rebollo y otros, 1977) en colaboración con el centro científico UAM-IBM, y el Mapa Piloto de Ocupación del Suelo de España (Núñez de las Cuevas y otros, 1983; Paredes, 1983), en colaboración con el IGN francés, que pretendía ensayar la validez de esta tecnología para la realización de un inventario global y periódico de nuestro país. La tarea, en ésta como en tantas aplicaciones de la Teledetección, está aún por hacer.

4. PROBLEMAS PLANTEADOS

Pese a tan magníficas posibilidades, el tratamiento de imágenes Landsat no es aún una panacea para los estudios de ocupación del suelo. Una breve panorámica a los presupuestos básicos que exigen tales tareas, nos lleva a plantear algunas objeciones de interés, derivadas tanto de los datos MSS-Landsat, como de los propios condicionantes del estudio.

4.1. *Problemas del sensor*

La dificultad más clara que emana de los datos MSS del Landsat es su escasa resolución espacial (79 m) que compromete los resultados, especialmente en áreas de compleja ocupación. Para espacios mediterráneos, las 0,62 hectáreas que ocupa el pixel ofrecido por la imagen MSS pueden incluir respuestas provenientes de varios tipos de ocupación, por tratarse de parcelas menores a dicha superficie, muy frecuentes en estas áreas geográficas.

Aún siendo mayores, podría también ocurrir que un pixel recogiera información de áreas fronterizas entre tipos de cobertura (así mismo típicas en estas regiones de intensa ocupación), con lo que se produciría de nuevo una confusión entre categorías. «De aquí que todas las fronteras sean, potencialmente al menos, fuente de error. En la práctica, cuanto una escena sea más compleja, sujeta a más cambios en las condiciones del terreno, serán más factibles los cambios en las firmas de la imagen y máx pixels serán clasificados erróneamente, debido a ese efecto fronterizo» (Link y Struve, 1978, p. 1075).

La débil resolución espacial es probablemente la más importante

fuente de error para datos MSS, por lo que los nuevos sensores tienden como objetivo prioritario a su perfeccionamiento⁵.

Junto a la resolución espacial, también hemos de tener en cuenta la información espectral que proporciona el sensor. Una determinada clase de cobertura puede ser bien nítida en el terreno pero difícilmente diferenciable en las longitudes de onda facilitadas por el MSS. Por ejemplo, un bosque de hoja caduca o un área irrigada tienen con frecuencia similares respuestas espectrales a un suburbio residencial ajardinado en la región visible e infrarrojo próximo. Sin embargo son nítidas las diferencias en el térmico, ya que la actividad clorofílica es más intensa en las áreas naturales. En nuestro caso concreto, existen clases de ocupación de difícil discriminación sobre datos MSS, pero más nítidas sobre otras regiones espectrales. Este sería el caso del pinar-encinar y de los prados de montaña-cultivos regados.

El último problema que afecta a estos estudios es la resolución temporal facilitada por el sensor. Ya hemos hablado del gran dinamismo que ofrecen algunas clases de cobertura, normalmente relacionadas con el área urbana. Si es precisa la actualización periódica de los inventarios, el plazo fijado debe considerar las características del área que se analiza. No obstante la periodicidad elegida, la información Landsat no ofrecerá problemas a este respecto, pues los 18 días que separan cada imagen de la misma escena suponen un margen suficiente para la obtención de imágenes idóneas, aún contando con las lagunas informativas debidas a la cobertura nubosa.

4.2. Problemas derivados del método

Para realizar un correcto inventario de ocupación del suelo es preciso fijar unos objetivos y unas líneas maestras que regirán el desarrollo de los trabajos. Aquí también podemos encontrar objeciones al empleo de datos Landsat, las cuales —aun comunes con otros sistemas de Teledetección— nos interesan especialmente antes de iniciar el tratamiento.

En primer lugar está la decisión sobre la leyenda del mapa, leyenda que debe abarcar de forma precisa la variación de coberturas recogidas en la zona de estudio, y a la vez no caer en el exclusivismo de servir únicamente para un determinado inventario. No existe al respecto un acuerdo general, y es cada investigador quien —en función de sus objetivos— selecciona la leyenda que le servirá de base para estratificar la información. Esto explica la falta de categorías netamente defini-

⁵ Piénsese en los datos TM (Landsat 4 y 5) con 30 m de resolución espacial, o en los provenientes del HRV (Spot), con 20 y 10 m.

das, el dominio de las clasificaciones inductivas y particulares y el alto grado de apreciación subjetiva en los resultados finales.

En una recopilación que hemos efectuado sobre veintiocho trabajos realizados mediante tratamiento de imágenes MSS del Landsat, se comprueba nítidamente esta dificultad. No existen criterios comunes, y son muy abundantes las clases de sentido más o menos abstracto, fruto de la combinación de categorías simples, o de características del paisaje muy localistas.

La importancia de este punto se pone aún más de manifiesto cuando consideramos la estrategia de la clasificación supervisada. Como es sabido, este criterio de clasificación pretende asignar cada pixel a unas categorías previamente fijadas (las categorías de la leyenda), con lo cual podemos forzar la clasificación al introducir en ella categorías de escaso valor espectral por un mal planteamiento de la leyenda.

Para obviar este problema consideramos de gran interés adoptar —con las debidas modificaciones a los espacios mediterráneos— la clasificación deductiva propuesta por el *U.S. Geological Survey* (Cfr. Anderson y otros, 1976). Se trata de un esquema jerárquico compuesto por cuatro niveles de detalle, adaptados cada uno a un sistema de Teledetección, pudiéndose también cubrir los dos niveles de mayor precisión con información estadística y trabajo de campo. Los cuadros I y II recogen la clasificación original, y una modificación basada en ella que hemos efectuado para espacios mediterráneos.

Para culminar con este breve repaso, cabe mencionar otros dos factores de interés cara al correcto planteamiento del estudio. Por un lado, la selección de las imágenes, por otro la verificación de los resultados.

Respecto al primer punto, conviene precisar que, junto al dinamismo temporal, hay que considerar en estudios de ocupación del suelo el ritmo estacional. Por ejemplo, los usos agrarios o forestales, presentan una clara alternancia estacional según en calendario de los cultivos o los estadios de crecimiento en las especies forestales. Esto exige la elección de varias imágenes de la misma zona, a fin de que se perfeccione la clasificación.

En la misma línea, se empleará una imagen de septiembre para discriminar mejor el cereal del viñedo, o una de enero para distinguir los árboles de hoja perenne de los caducifolios.

Para datos Landsat es de gran interés este acercamiento multitemporal, si bien conlleva un importante tratamiento adicional que permita la superposición de imágenes. Es preciso para ello realizar correcciones radiométricas y geométricas, ciertamente complejas, como luego veremos.

Por último, apuntaremos siquiera alguna idea sobre la verificación de los resultados. Un mapa de ocupación del suelo debe cotejarse con la realidad mediante el correspondiente trabajo de campo que nos per-

CUADRO I
 CLASIFICACION DE USOS Y OCUPACIONES DEL SUELO PROPUESTA POR
 EL U.S. GEOLOGICAL SURVEY

| <i>NIVEL I</i> | <i>NIVEL II</i> |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Area urbana o construida | 11. Residencial 12. Comercial y servicios 13. Industrial 14. Transporte y comunicaciones 15. Complejos industriales y comerciales 16. Mezcla de área urbana 17. Otras áreas urbanas |
| 2. Area agrícola | 21. Cultivos y pastos 22. Huertos, viñedos, viveros y cultivos ornamentales 23. Granjas 24. Otras áreas agrícolas |
| 3. Praderas y eriales | 31. Herbáceas 32. Matorrales 33. Mezcla |
| 4. Area forestal | 41. Hojas caducas 42. Hojas perennes 43. Mezcla |
| 5. Agua | 51. Canales 52. Lagos 53. Pantanos 54. Bahías y estuarios |
| 6. Zonas pantanosas | 61. Con cubierta forestal 62. Sin cubierta forestal |
| 7. Terrenos estériles | 71. Salinas 72. Playas 73. Otras áreas arenosas 74. Roca desnuda 75. Canteras y minería 76. Areas de transición 77. Mezcla |
| 8. Tundra | 81. Tundra de matorral 82. Tundra herbácea 83. Tundra de suelo desnudo 84. Tundra pantanosa 85. Mezcla |
| 9. Hielos y nieves perpetuas | 91. Nieves perpetuas 92. Glaciares |

FUENTES: Anderson, J. R. E. y otros, 1976.

CUADRO II
CLASIFICACION DE OCUPACIONES DEL SUELO PROPUESTA PARA
ESPACIOS MEDITERRANEOS

| <i>NIVEL I</i> | <i>NIVEL II</i> |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Area urbanizada | 11. Densa edificación 12. Urbanización dispersa 13. Urbanización ajardinada 14. Núcleos rurales |
| 2. Terreno cultivado | 21. Secano herbáceo 22. Secano leñoso (vid) 23. Secano arbóreo (olivo-frutales) 24. Mezcla 25. Cultivos regados |
| 3. Areas forestales | 31. Bosques de hoja caduca 32. Bosques de hoja permanente 321. Encinar* 322. Pinar 323. Mezcla encinar-pinar 33. Bosque alternante con matorral |
| 4. Matorral, praderas y pastizales | 41. Prados permanentes de montaña 42. Prados alternantes con arbolado 43. Matorral 44. Matorral alternante con arbolado 45. Matorral, pastizal y/o cultivos alternantes con arbolado (dehesa) |
| 5. Superficie improductiva | 51. Roquedo desnudo. 52. Playas y superficies arenosas 53. Canteras y minería |
| 6. Agua | 61. Ríos 62. Lagos naturales 63. Embalses 64. Canales de riego |

* Esta subdivisión puede, lógicamente, ampliarse a otras especies forestales.

mita conocer su grado de fiabilidad. Para ello se recomienda la elección del muestreo aleatorio (Hord y Brooner, 1976; Justice y Townshend, 1981), por tratarse de un procedimiento bastante sencillo. Se eligen aleatoriamente un número de puntos test, en función de la superficie y el grado de exactitud requerido, que posteriormente se comprueban sobre el terreno y la fotografía aérea, para calcular, por último, los residuales sobre cada una de las categorías.

5. PRESENTACIÓN DE UN CASO PILOTO. EL SUROESTE DE LA PROVINCIA DE MADRID

Al objeto de presentar más claramente la metodología propia de estos estudios, hemos creído conveniente incluir algunos ensayos realizados sobre el Suroeste de la Comunidad Autónoma madrileña.

Antes de iniciar nuestra exposición conviene aclarar que se trata de un trabajo aún no concluido que forma parte de nuestra Tesis Doctoral. Aún con las imperfecciones que todo proyecto en gestación conlleva, hemos preferido incluirlo para mostrar ejemplos de aplicación específica.

5.1. *Localización de la zona de estudio*

La zona geográfica designada como ensayo, corresponde al extremo suroeste de la provincia de Madrid, entre las de Avila y Toledo. Egloba unos 500 km² ocupados por los términos municipales de Aldea de Fresno, Cadalso de los Vidrios, Cenicientos, Chapinería, Navas del Rey, Pelayos de la Presa, Rozas de Puerto Real, San Martín de Valdeiglesias y Villa del Prado.

Se trata de una zona de gran interés geográfico, ya que abarca contactos litológicos, morfológicos, e incluso climáticos, y —como consecuencia— una amplia gama de tipos de cobertura del suelo. Es un área puente entre la Sierra del Guadarrama y la de Gredos, unidas por el valle de San Martín; entre los materiales cristalinos y los terciarios, bien nítidos en la falla próxima a Villa del Prado; y entre el cereal meseteño y el policultivo serrano. Área de contrastes, por tanto, idónea para ensayar esta metodología, si bien el pequeño tamaño de las parcelas vaya a dificultar posteriormente la nitidez de la clasificación.

Resumiendo las características de la zona, podríamos decir que se trata de un área de transición entre el Sistema central y la Meseta, que alberga por tanto ocupaciones del suelo propias de uno y otro ámbito. La topografía también recoge marcados contrastes, por tratarse de un área residual, lo que provoca aún mayores discontinuidades en las ocupaciones. A ello se añade el ancestral e intenso poblamiento, que origina una parcelación minuciosa, un espacio heterogéneo y confuso, pese a tender al monocultivo local.

5.2. *La obtención de la verdad-terreno*

Partíamos en este trabajo de un primer documento de ocupación del suelo obtenido por tratamiento digital de imágenes Landsat. Se trata del Mapa Piloto elaborado por el IGA y el IGN francés como respuesta a

un convenio subvencionado por el CEOTMA (Núñez de las Cuevas y otros, 1983; Paredes, 1983). Conviene precisar que dicho documento recogía una superficie mucho mayor, correspondiente casi a una escena completa, y que se había realizado por tratamiento de una sola imagen, concretamente de julio de 1981.

Apartándonos un poco de los estudios convencionales en Teledetección, la obtención de la verdad terreno se realizó como paso previo a los trabajos, con objeto de testificar en todo momento los resultados obtenidos en las clasificaciones.

Esta información se obtuvo mediante fotointerpretación y trabajo de campo. El material de base corresponde al vuelo realizado por el Instituto Geográfico Nacional en Septiembre de 1983. Este vuelo, a escala 1:30.000, fue estudiado con detalle gracias a un estereoscopio de barrido (Oldelft ODSS-III) que nos permitió delimitar las áreas de ocupación homogénea, posteriormente refinadas y corregidas mediante *trabajos de campo*.

Con estos datos elaboramos un mapa base verdad-terreno (inicialmente a escala 1:30.000), tras la restitución de los errores geométricos derivados de la foto aérea. Posteriormente se generalizó este mapa a escala 1:200.000 superponible a la cartografía provincial realizado por el IGN (1982).

Esta primera fase de trabajo, tediosa en ocasiones pero de gran eficacia cara a los posteriores resultados, nos permitió una aproximación bastante precisa a la ocupación en el área estudiada. Básicamente se distinguen cuatro sectores forestales: al norte de San Martín, entre San Martín y el valle del Alberche, al Sur de Cenicientos (todos ellos formados principalmente por diversas especies de pinar y encinar), y el área inmediata a Casillas, formada por caducifolios. Junto a la zona forestal, aparecen dos dominios agrícolas: el del viñedo, en ocasiones asociado al olivar, que ocupa el valle de S. Martín, Cadalso de los Vidrios, alrededores de Cenicientos y el valle del Alberche, cerca de Villa del Prado; y el cerearícola, más claro entre el Encinar del Alberche y Villa del Prado y en Aldea del Fresno, aunque nunca alcanza un gran desarrollo. Precisamente en estos términos se recoge los únicos ejemplos de cultivos regados, aprovechando las terrazas del Alberche. Este boceto se completa con los prados naturales de Rozas de Puerto Real, y los pastizales arbolados, propios de Chapinería y Navas del Rey.

5.3. *Equipo de tratamiento digital utilizado*

Una vez realizados los trabajos previos (trabajos de campo, estratificación global del terreno), comienza propiamente el tratamiento digital. Para ello hemos contado con la inestimable ayuda del Centro Científico UAM-IBM, que posee —además de una amplia experiencia en este

campo—, un equipo de tratamiento muy sofisticado, apto para una amplia variedad de operaciones digitales.

Este equipo, designado como IBM 7350, «Image Processing System» y conectado al ordenador central IBM 370/158 MP, está compuesto por una unidad de control —encargada del almacenamiento y manipulación de los datos, una consola de visualización —con resolución de 1024×1024 pixels y una paleta de color de hasta 4096 tonos—, y un monitor conversacional, de 32 líneas y 80 caracteres, al que se conecta un cursor para la introducción de datos auxiliares.

El sistema, por último, se completa con un paquete de programas denominado HLIPS (*High Level Image Processing System*), el cual —mediante un diálogo interactivo por el sistema de Menús— permite realizar una gran cantidad de operaciones digitales: visualización, expansión local, combinación de bandas, componentes principales, registro de imágenes, clasificación supervisada y de cluster, manipulación del color, inclusión de gráficos y polígonos, histogramas de frecuencia, etcétera.

5.4. Correcciones efectuadas

Parece un paso obligado en cualquier aplicación realizada sobre datos Landsat, la previa corrección radiométrica y geométrica de las imágenes. Como sabemos son variadas las fuentes de error, ya sean debidos a la plataforma o al propio sensor, pero no han de tomarse como obstáculo previo a los trabajos, desde mi punto de vista.

Dado que se trataba de una zona pequeña, hemos preferido omitir en una primera etapa, al menos, estas correcciones, juzgando que sería de mayor interés contar con los datos originales, para realizar las correcciones precisas sobre el documento temático final.

Ahora bien, se presentaba el problema de localizar correctamente los campos de entrenamiento y los campos test, que sirvieran de soporte a la clasificación⁶, ya que en la imagen original es muy difícil situar con precisión los límites poligonales, sobre todo en lo referido a los campos que servirán como test.

Este problema fue salvado gracias a una expansión de la imagen. Aplicando unos coeficientes de ampliación en los dos ejes a todos los pixels originales, conseguimos una aproximación bastante certera a la escala buscada (1:200.000). Sobre la imagen ampliada —y con ayuda de un transparente— se situaron los campos de entrenamiento y los campos test, que en este caso pretendimos que coincidieran con los lí-

⁶ En los procesos de tratamiento digital, los campos son polígonos delimitados en la imagen. Los campos de entrenamiento servirán de fuente para el cálculo de estadísticas de clase, y los test engloban el área que será clasificada.

mites municipales, con el fin de comparar posteriormente los resultados de la clasificación con las estadísticas oficiales. Mediante el cursor se digitizaron en la consola de visualización estos términos, de forma que sirvieran como ámbito de trabajo para la posterior clasificación.

El programa de expansión permite, además, mantener los valores en coordenadas de los pixels originales, por lo que, tras delimitar los campos, fue factible retornar a la información de partida.

5.5. Ensayos de clasificación

La clasificación digital (*'pattern recognition'* en la terminología anglosajona) tiene como finalidad asignar cada uno de los pixels o unidades de información a una categoría, que se pretende sea coherente con la leyenda buscada. El resultado de todo proceso de clasificación será, pues, un mapa temático en el que las clases de ocupación del suelo son representadas en colores sobre terminales apropiados, o en símbolos alfanuméricos sobre una impresora de líneas.

No vamos ahora a definir las distintas estrategias de clasificación. Como es sabido, existen dos acercamientos básicos: supervisado y no supervisado. El primero parte de unos datos aportados por el conocimiento del terreno, y por tanto se pretende identificar las clases de información con las clases espectrales. El segundo, toma el camino inverso: «buscar» en los valores espectrales clases homogéneas, que puedan relacionarse por el investigador con las categorías requeridas en su leyenda.

Para problemas de ocupación del suelo se han empleado ambos procedimientos. Para diversos autores franceses (GDTA-CEE, 1982; Girad, 1982 y Le Men, 1981, entre otros), resulta de mayor interés el acercamiento no supervisado al reducir el componente subjetivo que introduce el investigador con la selección de categorías y campos piloto.

Sin embargo la literatura anglosajona (Campbell, 1981; Strahler, 1980; Wastenson, 1978...), se inclina más por aplicar el método supervisado, por ser a su juicio más coherente con los objetivos perseguidos.

Personalmente pensamos, con otros autores (Justice y Townshend, 1981; Núñez de las Cuevas y otros, 1983), que es más interesante combinar ambos sistemas de clasificación, pues pueden apoyarse mutuamente para refinar los resultados.

En nuestro caso concreto, el primer paso consistió en un acercamiento supervisado. Se designaron 17 campos de entrenamiento correspondientes a 12 categorías de ocupación ajustadas a la leyenda previamente establecida. Especial cuidado se ha de tener en la correcta localización de dichas áreas y en que se incluyan ejemplos suficientemente representativos de la clases de cobertura buscadas. Si se trata de un área de topografía accidentada —como es nuestro caso—, será de inte-

rés introducir varios campos de la misma clase situados en distintos niveles de pendiente, con lo que se reduce la influencia del relieve en los resultados de la clasificación.

Una vez definidos los campos y calculadas sus estadísticas en las cuatro bandas, se inicia la clasificación propiamente dicha. El sistema HLIPS permite realizar dos tipos de clasificación supervisada: de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*) y de prismas espectrales (*paralleliped classifier*).

El clasificador de máxima verosimilitud permite asignar cada pixel a una de las categorías definidas por el usuario, en función de la 'similitud' espectral. Más en concreto, se incluye a cada elemento en aquella clase a la que posee mayor probabilidad de pertenecer. Para el cálculo de este valor, es preciso conocer previamente el valor teórico de la probabilidad para cada clase. Este dato a priori puede ser igual para todas las clases (en nuestro caso un 8% contando de 0 a 100), o bien ponderarse convenientemente en función de la importancia de cada categoría.

Nosotros utilizamos ambos procedimientos para clasificar una imagen correspondiente al 16-07-1981. En el primer caso contando una probabilidad uniforme, se sobredimensionan aquellas categorías poco presentes en la zona (regadío, urbana, caducifolios...) en perjuicio de las clases con mayor extensión ocupada (pinar, encinar, viñedo). Por su parte, la ponderación teórica de la probabilidad nos ofrece unos resultados bastante correctos, reduciéndose la confusión a las áreas de cobertura menos homogénea.

Esta ponderación puede efectuarse con varios criterios: en función de la importancia estimada por el autor; relacionándola con los datos estadísticos oficiales o con los obtenidos por fotografía aérea. Nosotros, hemos elegido como criterio los propios resultados ofrecidos en la clasificación simple. En otras palabras, realizamos un ensayo concediendo igual probabilidad de ocurrencia a todas las clases, para ponderar —en un segundo paso— esta probabilidad teórica en función de los resultados que ofreció el primer intento (porcentaje superficial ocupado por cada clase respecto al total clasificado).

Con los resultados deducidos del segundo intento, siempre sobre la imagen de julio, ya podemos realizar comparaciones aceptables con los datos estadísticos. Más en concreto, hemos relacionado nuestros datos con la información ofrecida por las Hojas de «Superficies ocupadas por los cultivos agrícolas» del Ministerio de Agricultura (1982).

Como se observa en el cuadro III, las desviaciones introducidas son aceptables para el viñedo-olivar y superficie forestal, y más discretos en cereal-barbecho. Pese a esta tendencia homogénea para ambas fuentes, se observan municipios en donde los errores son notables. Se trata en todos los casos de términos que albergan tipos de ocupación o porcentajes superficiales poco comparables con el resto, de ahí el error.

Esto ocurre con Chapinería por la escasa presencia del viñedo; en Rozas de Puerto Real, por la gran dimensión de praderas naturales; o en Aldea del Fresno, en donde el cereal adquiere un valor muy superior a la media.

Pese a estos datos, no hemos de olvidar que son fuentes bastante dispares en su concepción, por lo que las comparaciones resultan delicadas: no existen criterios comunes en la leyenda y la asignación puede dar lugar a imprecisiones para la fuente estadística oficial. Con estas salvedades, las variables comparadas son bastante semejantes en cuanto tal contenido.

CUADRO III
RELACION ENTRE LOS DATOS ESTADISTICOS Y LOS OFRECIDOS POR LA CLASIFICACION DIGITAL (IMAGEN DE JULIO)

| MUNICIPIO | PORCENTAJE SUPERFICIAL OCUPADO POR LAS VARIABLES | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|-----|------------------|-----|-----------------|-----|
| | Viñedo-Olivar | | Superf. Forestal | | Cereal-Barbecho | |
| | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) |
| Aldea del Fresno | 8,2 | 25 | 58,1 | 53 | 17,5 | 3 |
| Cadalso de los Vidrios ... | 42,6 | 37 | 35,4 | 42 | 1,8 | 0,9 |
| Cenicientos | 37,1 | 36 | 31,7 | 44 | 1,7 | 1,2 |
| Chapinería | 1,6 | 16 | 37,4 | 66 | 3,1 | 9 |
| Navas del Rey | 6,2 | 11 | 70,8 | 68 | 6,9 | 3 |
| Pelayos de la Presa | 24,3 | 26 | 36,4 | 59 | 7,4 | 1 |
| Rozas de Puerto Real | 5,0 | 16 | 18,5 | 37 | 2,3 | 0,8 |
| San Martín de Valdeig. ... | 30,7 | 30 | 57,3 | 58 | — | 1 |
| Villa del Prado | 23,2 | 32 | 36,3 | 46 | 6,5 | 3 |

(1) Porcentaje superficial ofrecido por la clasificación digital Landsat.

(2) Porcentaje superficial extraído de los datos estadísticos del Ministerio de Agricultura.

Respecto a la clasificación no supervisada, se han realizado ensayos con un algoritmo iterativo instalado en HLIPS, pero los resultados aún resultan muy discretos. Además, no es posible realizar intentos de cálculo superficial por municipios, pues el programa en cuestión no trabaja con polígonos complejos (términos municipales) sino únicamente con rectángulos.

Aunque se mantiene esta salvedad, la clasificación no supervisada mejora notablemente sus resultados con la introducción de valores supervisados. Esta estrategia, que bien puede denominarse mixta, se basa en combinar los dos procedimientos anteriores. Los centros iniciales de

los agrupamientos o cluster, no se tomaron sobre el histograma de la imagen —como en el procedimiento no supervisado—, sino que fueron introducidos manualmente haciendo coincidir los cluster de partida con las clases de cobertura ofrecidas por la clasificación supervisada. Estamos en la línea de realizar el paso contrario, enriqueciendo la clasificación supervisada con estadísticas obtenidas por el análisis de cluster.

5.6. *El empleo de bandas artificiales*

Es poco frecuente en los estudios de ocupación del suelo, el empleo en la clasificación de nuevas bandas, creadas por combinación de las originales. Suponemos que se considera irrelevante esta información por ser implícita a los datos iniciales.

No obstante no son desdeñables, a nuestro juicio, estas combinaciones, pues pueden ofrecer dimensiones nuevas, o al menos más evidentes, de una determinada categoría.

Este sería el caso de los Componentes Principales, muy empleada para sintetizar la información de partida en los estudios multitemporales. Como es bien conocido, esta técnica trata de buscar nuevas variables, más ajustadas a los datos originales y no correlacionadas entre sí, por lo que se reduce la dimensionalidad de los datos.

Sobre la imagen de julio hemos ensayado este procedimiento con la obtención de tres componentes que engloban el 99% de la varianza original.

El análisis visual de los componentes refleja el contenido informativo de cada uno de ellos. En el primero se incluyen las masas de vegetación forestal y agraria, con escasa presencia de los núcleos urbanos. En el segundo éstos son más patentes, mientras el tercero recoge la información residual, más importante en las áreas de compleja ocupación.

Es posible también utilizar estas bandas artificiales como fuente de la clasificación en lugar de los datos de partida. Con el fin de ensayar su validez realizamos una clasificación supervisada sobre los Componentes Principales de la imagen de julio. Los resultados son interesantes pues aunque se exageran variables de poca importancia superficial (regadío, urbano, matorral), se permite la discriminación de otros tipos de cobertura poco separables en la imagen original, como sería el caso del pinar y el encinar, o el cereal y el viñedo.

5.7. *La clasificación multitemporal*

Ya hemos comentado el interés del tratamiento multitemporal para la cartografía de ocupación del suelo. No sólo se trata de actualizar pe-

riódicamente los cambios, sino también de contabilizarlos, para lo cual es preciso comparar la situación presente con el inmediato pasado. Además de esta finalidad, podemos optar por el tratamiento multitemporal para discriminar tipos de ocupación sujetos a alteraciones estacionales, consiguiendo mejorar los resultados mediante la comparación de varias imágenes de la misma zona.

«Una comparación de los resultados proporcionados por el análisis monotemporal indica que el análisis multitemporal no solamente incrementa el porcentaje de clasificación correcta sino también que reduce el de clasificación errónea de las superficies forestales» (Berg y Galli, 1980, p. 5).

Esta concepción, con ser de gran interés implica importantes problemas para llevarlo a cabo. Se trata de imágenes de la misma zona pero sujetas a condiciones atmosféricas peculiares (grado de insolación, humedad, difusión...), por lo que las respuestas espectrales ofrecidas al sensor son de compleja comparación. Más importante aún es el problema de ajustar las dos imágenes, de modo que sean superponibles. Para ello se emplean programas de registración, los cuales una vez facilitados por el usuario los puntos de control, calculan los modelos de deformación polinomial precisos para realizar tal ajuste. A estas objeciones hemos de añadir el aumento en el volumen de información manejada, aumento que repercute en el tiempo y el coste del tratamiento (del orden de un 73% de incremento para el manejo de dos imágenes, y del 99,5% para el tratamiento de cuatro).

Actualmente nos hallamos en fase de ensayo de este acercamiento multitemporal, por lo que no podemos evaluar con rigor los resultados. Sí conviene precisar que aporta elementos de gran interés a la discriminación de especies, como podemos observar en los gráficos del apéndice, tomando como ejemplo las imágenes de julio y enero. Todas las categorías pierden valor de reflectancia como consecuencia del menor grado de insolación en la imagen de enero, y tienden a 'empastarse' algunas categorías (como regadíos y prados) como consecuencia de la mayor humedad.

6. CONCLUSIONES

1. Como hemos tratado de mostrar en estas páginas, la cartografía de ocupación del suelo es un elemento básico para el conocimiento del espacio que nos rodea.

2. La utilización de los sensores espaciales, especialmente a través del tratamiento digital de las imágenes, proporciona una valiosa información, aún no suficientemente explotada a nuestro país, para la confección de este tipo de cartografía.

3. Aún con las limitaciones de resolución espacial y espectral los

datos MSS pueden ser una eficaz fuente de información para la cartografía e inventario de la ocupación del suelo, sobre todo a escalas regionales, y en espacios de cierta homogeneidad.

4. Es posible realizar comparaciones entre los datos obtenidos mediante clasificación digital de imágenes y las estadísticas oficiales; la Teledetección, por tanto, puede ofrecernos también un importante complemento de información catastral.

5. El método de tratamiento debe ajustarse a la propia complejidad del espacio. No obstante parece claro que la clasificación supervisada de máxima verosimilitud, ofrece resultados muy competentes gracias a su apoyo en el conocimiento del terreno. Aún más, la ponderación a priori de la probabilidad permite afinar las asignaciones, de forma sobresaliente en las categorías de poca extensión superficial.

6. El acercamiento multitemporal, con los problemas que conlleva, puede paliar en las clasificaciones muchos de los defectos debidos a confusión espectral entre categorías, si bien será imprescindible un correcto registro de las imágenes.

Agradecimientos

Manifiesto mi gratitud a los doctores Rodolfo Núñez de las Cuevas y José Manuel Casas Torres, por las sugerencias realizadas a lo largo del desarrollo de los trabajos. Así mismo, ha sido inestimable la ayuda prestada por el centro científico UAM-IBM en el tratamiento digital de las imágenes, y de una forma especial de sus investigadores Fortunato Ortí y Francisco Ramírez.

Octubre, 1984

BIBLIOGRAFIA

- ABIODUN, A. A. (1978): «The economic implications of remote sensing from space for developing countries», en *Earth observation from Space and management of planetary resources*, E.S.A. SP-14, Paris, pp. 575-584.
- ANDERSON, J. R. E.; HARDY, R. y WITMER, R. (1976): *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*, U.S. Geological Survey, Prof. Paper 964, 28 pp.
- CAMPBELL, J. G. (1981): «The use of Landsat MSS data for Ecological Mapping», en *Marching remote sensing technologies and their applications*, Remote Sensing Society, London, pp. 143-162.
- G.D.T.A.-C.E.E. (1982): *Recherche sur la cartographie de l'occupation des sols par Teledetection*, I.G.N., Département de Télédetection et de cartographie spatiale, Paris, 58 pp.

- GIRARD, C. M. (1981): «Grassland mapping using satellite multitemporal data», en *'Matching remote sensing technologies and their applications'*, Remote Sensing Society, London, pp. 111-122.
- HORD, R. M. y BROONER, W. (1976): «Land use map accuracy criteria», *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, vol. 42 (5), pp. 671-677.
- ISTVAN, T. y CSABA, H. G. (1982): «Budapest a világürböl», *Foldrajzi Ertesítő* (Geographical Bulletin), XXXI (1), pp. 121-130.
- JENSEN, J. R. y otros (1983): «Urban/Suburban land use analysis», en Colwel, R. (Ed.), *'Manual of Remote Sensing. Second Edition'*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, vol. 2, pp. 1571-1666.
- JUSTICE, Ch. y TOWNSHEND, J. R. G. (1981): «The use of Landsat data for land cover inventories of Mediterranean lands», en Townshend, J. R. G. (Ed.), *Terrain Analysis and Remote sensing*, George Allen & Unwin, London, pp. 135-153.
- LE MEN, H. (1981): «Cartographie de l'occupation du sol para utilisation conjointe de une image de satellite et de donnes statistiques», *4eme Colloque International du GDPA*, Toulouse, pp. 277-282.
- LICHTENEGGER, J. (1981): «Detailed land use classification based on multitemporal Landsat MSS-data», en *Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 997-1005.
- LINK, L. E. y STRUVE, H. (1978): «Problems and concepts in remote sensing of land use», en *Proceedings 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1073-1079.
- MENSUA FERNÁNDEZ, S. (1971): «Presentación del mapa de utilización del suelo de la provincia de Zaragoza», *Geographica*, vol. XII (4), pp. 203-208.
- MENSUA FERNÁNDEZ, S. y SOLANS, M. (1965): «Mapa de utilización del suelo de Navarra», *Geographica*, vol. VII, pp. 9-15.
- NUÑEZ DE LAS CUEVAS, R. (Ed.) (1976): «*Thematic Mapper, Land Use, Geological Structure and Water resources in central Spain*», NASA, Final Report, project n.º 28.760.
- NUÑEZ DE LAS CUEVAS, R. y otros (1983): «Mapa de usos del suelo de la Región Central. Estudio piloto sobre la aplicación del tratamiento digital de imágenes Landsat a la confección de mapas de usos del suelo», *Geographica*, vol. XXV, pp. 61-68.
- PAREDES, J. (1983): «Cartografía de la Ocupación del suelo mediante Teledetección por satélite», *Cimbra*, vol. XX, pp. 18-28.
- REBOLLO, M.; ORTÍ, F. y CAMARASA, J. M. (1977): «*Supervised and unsupervised classification of the Delta of the Ebro river. Land use study using Landsat data*», Centro de Investigación UAM-IBM, Madrid, SCR 01-77.
- SANCHO COMINS, J. (1979): «*Castellón de la Plana. Mapa de utilización del Suelo*», Caja de Ahorros y Monte de Piedad, Castellón de la Plana.
- SCHENEIDER, S. (1980): «Interpretation of satellite imagery for determination of land-use data», *International Journal of Remote Sensing*, vol I (1), pp. 85-90.
- STRAHLER, A. H. (1980): «The use of prior probabilities in Maximum likelihood classification of remotely sensed data», *Remote Sensing of Environment*, vol. X (2), pp. 135-163.
- WASTENSON, L.; ORHAUG, T. y INGUAR, S. (1978): «Swedish experiences on forest inventory and land use mapping by automatic classification of digital MSS data from Landsat and aircraft», en *'Proceedings on the International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment*, Freiburg, pp. 1475-1488.

RESUMEN

Los estudios de ocupación del suelo revisten un particular interés para el mejor conocimiento y control de los recursos de la Tierra. Este hecho, unido al carácter ecológico (interacción hombre-medio) que la ocupación del suelo representa, confiere a estos estudios un gran interés para la investigación geográfica.

Aquí se presenta una metodología alternativa a los inventarios convencionales, centrados en la fotointerpretación y el trabajo de campo. Se propone el tratamiento digital de imágenes espaciales como medio más rápido y económico para este tipo de estudios, ilustrando su aplicación con un caso piloto localizado en el Suroeste de la Comunidad Autónoma madrileña.

ABSTRACT

The studies regarding land-cover have a remarkable interest for better knowledge and control of Earth resources.

This fact, together with the ecological character that the land cover represents (interaction man-environment) give a great interest to these studies in relation with geographic investigation.

It is presented under this scope, an alternative methodology versus conventional inventories which are generally based on photointerpretation and field work.

It is proposed the use of digital processing of spatial Landsat images being the fastest and more economic for this type of studies. This is sampled with case-study located in South West Madrid (Autonomous Community of Madrid).

RÉSUMÉ

Les études d'occupation du sol revêtent un special intérêt pour une meilleure connaissance et contrôle des ressources de la Terre. Ce fait confère a ces études une grande importance a la recherche géographique, uni au caractère écologique (interaction homme-milieu).

Nous présentons ici, une méthodologie alternative aux inventaires conventionnels, basés a la photointerprétation et au travail de champ. Nous proposons le traitement digital d'images spatiales comme le moyen, le plus rapide et économique pour ce type d'étude, illustré d'un cas pilote situé au Sud-Ouest de la Communauté Autonome de Madrid.