

LLETRES DE BATALLA

Evolució metodològica i instrumental en la detecció de les cobertes i usos del sòl i en l'anàlisi dels seus canvis

Pere Serra*, Xavier Pons*,** & David Saurí*

Rebut: 18.06.03

Acceptat: 01.11.03

Resum

En aquest article es descriu l'evolució històrica de les tres principals fonts per localitzar les cobertes i usos del sòl (CUS): el treball de camp, la fotografia aèria i la teledetecció amb imatges de satèl·lit. A continuació, s'analitza el mètode més emprat a l'hora de quantificar els canvis de les CUS, la comparació postclassificació o superposició de mapes, per tal d'indicar-ne les principals problemàtiques que pot comportar. Finalment, es presenta un exemple d'anàlisi de canvis de CUS (de 1977 a 1997) de vint-i-un municipis de l'Alt Empordà a partir d'imatges de satèl·lit.

MOTS CLAU: cobertes i usos del sòl, treball de camp, fotografia aèria, teledetecció amb imatges de satèl·lit, comparació postclassificació.

* Departament de Geografia, Edifici B, Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra. Tel: 93 581 32 73.
A/e: pere.serra@uab.es

** Centre de Recerca, Ecològica i Aplicacions Forestals, Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona. 08103 Bellaterra.
A/e: xavier.pons@uab.es

Abstract

The evolution of methods and instruments for the detection of land cover and land use and for the analysis of changes in them

This paper describes the historical evolution of the three main sources for the study of land cover and land use: field work, aerial photographs and satellite remote sensing images. It goes on to analyse the commonest method for quantifying land cover and land use changes, the postclassification comparison or superposition of maps, discussing the principal problems associated with this method. Finally, an example of the analysis of land cover and land use changes in twenty-one municipalities of the Alt Empordà from 1977 to 1997 using remote sensing images is presented.

KEY WORDS: land cover and land use, field work, aerial photographs, remote sensing images, postclassification method.

Resumen

Evolución metodológica e instrumental en la detección de las cubiertas y los usos del suelo y en el análisis de sus cambios

En este artículo se describe la evolución histórica de las tres principales fuentes en la localización de las cubiertas y usos del suelo (CUS): el trabajo de campo, la fotografía aérea y la teledetección con imágenes de satélite. A continuación, se analiza el método más común a la hora de cuantificar los cambios en las CUS, la comparación postclasificación o superposición de mapas, indicando las principales problemáticas que puede comportar. Finalmente, se presenta un ejemplo de análisis de cambios de CUS (de 1977 a 1997) de veintidós municipios del Alt Empordà a partir de imágenes de satélite.

PALABRAS CLAVE: cubiertas y usos del suelo, trabajo de campo, fotografía aérea, teledetección con imágenes de satélite, comparación postclasificación.

Introducció

L'ús del territori per part dels éssers humans n'ha comportat la modificació constant, per exemple per mitjà de la dessecació d'estanys i llacunes, de la tala de boscos o del conreu del sòl. Des del segle XIX, molts estudis i recerques han intentat quantificar aquests canvis i extreure'n les conseqüències ambientals. Recentment s'ha calculat que un 66 % de la superfície de les terres emergides s'usa per a la producció o habitació dels humans (Ludevid, 1995). Els humans, doncs, han expandit les seves activitats pràcticament a tots els racons de la superfície terrestre i, avui, les transformacions que se'n deriven esdevenen una força inductora del canvi global de primer ordre (Veldkamp & Fresco, 1996).

Les conseqüències de les transformacions es manifesten cada vegada en més àmbits, des de l'escalfament climàtic fins a la degradació del sòl o la pèrdua de biodiversitat. El concepte de canvi ambiental, tant des del vessant sistèmic o global (emissions de diòxid de carboni a l'atmosfera, etc.) com acumulatiu¹

¹ És a dir, serien aquells canvis, com la desforestació, que no estan connectats a cap sistema que funcioni globalment (com ara l'atmosfera o els oceans), però que poden adquirir un caràcter global segons la seva magnitud.

(desforestació, erosió del sòl, etc.) ha d'incloure, per tant, la persistent influència de l'acció humana en les condicions i processos de la superfície terrestre (Turner II, 1994).

Els canvis afecten el que denominem cobertes i usos del sòl (CUS) i estan directament relacionats amb les alteracions mediambientals, almenys en quatre àrees d'interès (Fischer, 1998): (i) tenen implicacions molt importants en l'equilibri dels fluxos d'energia; (ii) contribueixen als canvis dels cicles biogeoquímics; (iii) modifiquen els cicles hidrològics; i (iv) influeixen en la complexitat ecològica.

L'anàlisi de la distribució espacial de les CUS és, doncs, un requisit inicial essencial per a una gran quantitat de disciplines i recerques (European Commission, 1998), a causa de la gran amplitud del terme. Així, podem trobar exemples en l'àmbit de la planificació territorial (Pujol & Pujadas, 1996), en l'estudi de les dinàmiques paisatgístiques (Ihse, 1995) i en la conservació de la biodiversitat (Pino *et al.*, 1998), així com en l'estudi de riscos i impactes ambientals. Entre aquests darrers destaquen la contaminació (Bouma *et al.*, 1998), la desertització (European Commission, 1998), la desforestació (Skole *et al.*, 1994) i els incendis forestals (Badia, 2000), entre d'altres. En tots aquests exemples les fonts emprades per analitzar les CUS han estat diverses. L'objectiu d'aquest article és, doncs, analitzar l'evolució històrica de les tres principals eines per localitzar i quantificar la superfície d'ocupació de les CUS, així com dels seus canvis: el treball de camp, la fotografia aèria i la teledetecció amb imatges de satèl·lit.

Conceptes bàsics

A continuació es defineixen breument alguns dels conceptes que s'empraran al llarg del text. Definim les cobertes del sòl com els diversos

estats biofísics de la superfície terrestre i del subsòl immediat, mentre que els usos del sòl inclouen, tant la manera en què els atributs biofísics del sòl es manipulen, com la finalitat per a la qual s'empra el sòl (Turner II *et al.*, 1999). Per exemple, un bosc és una coberta i l'explotació per a fusta és un ús. A l'efecte pràctic, però, aquesta distinció en molts casos no queda tan clara, ja que si només s'observa o es fotointerpreta una coberta no se sap quin ús té, o de vegades es pot determinar quin és l'ús, però sense poder concretar quina és la coberta (cas d'un camp de futbol observat en una foto aèria en blanc i negre: si és de gespa, de ciment, etc.). Per tant, en aquest article no es distingiran les cobertes dels usos del sòl i es tractaran sota la denominació conjunta de cobertes i usos del sòl (CUS).

L'anàlisi de les dades que es presentarà en aquest treball s'ha realitzat mitjançant el sistema d'informació geogràfica MiraMon (Pons, 2000). Un sistema d'informació geogràfica (SIG) és un programa que permet emmagatzemar, recuperar, modificar i combinar qualsevol tipus de variables georeferenciades (Pons, 1996; Chuvieco, 2002). En els SIG s'acostuma a diferenciar les dades amb estructura de trama (*raster*) i les dades amb estructura vectorial. La primera estructura correspon a l'emmagatzematge de dades per mitjà de la divisió del terreny en una malla regular, representada per píxels (terme provinent de l'anglès *picture element*, que és l'element més petit de les imatges que es pot processar), sobre la qual es codifiquen les diverses variables que integren el sistema. En canvi, en l'estructura vectorial el sistema d'emmagatzematge es fa mitjançant les coordenades de les vores de les unitats temàtiques.

En un sentit ampli, la teledetecció s'entén que és aquella tècnica que permet obtenir informació sobre un objecte, àrea o fenomen per mitjà de l'anàlisi de les dades adquirides

per un instrument que no hi està en contacte (Chuvieco, 2002). Per tant, dins d'aquesta definició la fotografia aèria forma part de la teledetecció, tot i que una definició més restringida faria referència només a sensors embarcats sobre plataformes espacials (satèl·lits). Dins de la teledetecció es diferencien quatre tipus de resolucions: la resolució espacial, l'espectral, la radiomètrica i la temporal.

La resolució espacial fa referència a la mida de la mínima unitat d'informació en el terreny (el píxel en el cas de les imatges de satèl·lit). La resolució espacial sovint es confon amb el concepte d'escala, que és la relació dimensional definida entre la realitat i la seva representació impresa (Robinson *et al.*, 1987).

La resolució espectral és el nombre de bandes de l'espectre electromagnètic i amplada que és capaç de captar un sensor. Tant la fotografia aèria com les imatges de satèl·lit capten l'energia electromagnètica que arriba del Sol a la Terra i que és reflectida o emesa. En el cas de la fotografia analògica, aquesta només pot enregistrar, típicament, l'energia que abasta l'espectre visible i l'infraroig proper (de 0,3 a 1,2 μm), mentre que les imatges satèl·lit poden enregistrar més longituds d'ona, com es veurà més endavant.

La resolució radiomètrica correspon a la capacitat d'un sensor per captar variacions en l'energia que rep, o sigui, és el nombre de valors diferents i discrets que pot prendre cada píxel (nivells de gris). En el cas de les imatges digitals aquesta resolució s'expressa en el nombre de bits que necessita cada element de la imatge per ser emmagatzemat; el valor més habituals és de 8 bits. La resolució temporal és la freqüència de pas del sensor per un mateix lloc a una mateixa hora; també es coneix com període de revisita i, finalment, la resolució temàtica fa referència al nombre de CUS que es diferencien en la llegenda.

Detecció de les CUS

Treball de camp

Històricament, el treball de camp ha estat el mètode més emprat per descriure i analitzar les CUS. El mètode inclou tant l'observació visual directa com les enquestes sobre el terreny (Whitby & Ollerenshaw, 1988). Com en qualsevol estudi similar, cal disposar de mostres suficientment representatives del total, especialment per a grans extensions de terreny.

A Catalunya hi ha diversos exemples de treballs realitzats per «observadors del territori», essencialment per mitjà de descripcions de les CUS de l'època. En són exemples les obres del segle XVIII *Diario de los viajes hechos en Cataluña (1785-1790)* de Francisco de Zamora (1973) o *Viatge a Catalunya (1787)* d'Arthur Young (1970). Entrat el segle XIX, però, es produí un avenç important amb l'aparició del *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de Ultramar* de Pascual Madoz, considerada l'obra més completa i sistemàtica de documentació i d'interpretació de la realitat espanyola de l'època (Pladevall, 1985).

Totes aquestes obres, basades en les descripcions i en les enquestes sobre el terreny, poden presentar problemes de percepció, o possibles errors involuntaris dels observadors o dels enquestats, o errors deliberats per motius fiscals, entre d'altres. En aquest darrer cas, cal esmentar el Cadastre d'Espanya, l'origen del qual va ser un impost aplicat a Catalunya a partir de 1715 (Pro, 1987), i gràcies al qual es poden analitzar les CUS majoritàries als segles XVIII i XIX, sobretot pel que fa a les CUS agràries (ocupació de vinyes, etc.). El 1749 es decretà el Cadastre d'Ensenada, aplicable a totes les províncies espanyoles, però no va ser fins al 1885 que es constituí el cadastre amb finalitats clarament

fiscals per a tot Espanya i es veié la necessitat de disposar d'un cadastre gràfic parcel·lari que s'instaurà a partir de la Llei del cadastre parcel·lari d'Espanya de 1906 (Pro, 1988). El mètode per obtenir-lo va consistir en l'aixecament sobre el terreny d'un croquis a mà alçada de les parcel·les i el seu posterior dibuix sobre els topogràfics per part dels pèrits del Ministeri d'Hisenda. Els propietaris rebien, seguidament, un full per a cada parcel·la on havien de declarar-ne la superfície, conreu i valor, i després es confrontaven els resultats amb els del pèrit. A l'hora de la veritat, però, el procés de creació va ser molt lent i amb força errors, i per aquest motiu es va plantejar en la Llei de 1932 substituir, on fos rendible, el croquis a mà alçada per la fotografia aèria (vegeu Fernández, 1998).

En resum, un dels grans problemes dels estudis basats exclusivament en el treball de camp és la dificultat en la quantificació sistemàtica, així com en l'exactitud dels mapes fets a mà. En els darrers anys, però, la implantació de la tècnica del Sistema de Posició Global (GPS) ha millorat extraordinàriament les possibilitats en l'exactitud de la localització de les CUS mitjançant el treball de camp. El GPS és un sistema d'orientació i navegació que funciona per mitjà de vint-i-quatre satèl·lits que orbiten al voltant de la Terra a uns 17.600 km, de tal manera que en qualsevol zona terrestre es rep com a mínim, en cas de no tenir ocultacions o altres problemes, el senyal de cinc d'aquests satèl·lits. Amb la recepció de quatre es pot saber la latitud, longitud i altura amb un error d'entre 1 m i 15 m, segons la qualitat del senyal i del tipus de GPS (Sánchez, 2002: <http://www.geocities.com/txmetsb/GPS.html>); aquestes dades es poden convertir a les més habituals x , y , z en el sistema cartogràfic de cada país (UTM en la cartografia terrestre del nostre).

La fotografia aèria

La fotografia aèria ha estat, els darrers cinquanta anys, el dispositiu de percepció remota sistemàtica de territoris extensos més emprat (Robinson *et al.*, 1987). L'aparició de la fotografia aèria es remunta, però, al 1859 quan Gaspar Félix de Tournachon obtingué les primeres fotografies des d'un globus captiu (Chuvieco, 2002). El 1909 Wilbur Wrihth va adquirir la primera fotografia aèria des d'un avió sobre Itàlia, mentre que la primera càmera aèria pròpiament dita (mètrica) va ser desenvolupada el 1915 per J. Moore-Brabazon, durant la Primera Guerra Mundial.

El vol aeri més antic i assequible que cobreix tot Catalunya és el de 1956-1957 (pancromàtic en blanc i negre), realitzat per l'exèrcit americà a escala 1:33 000 aproximadament, que avui és vist com un document de gran valor per analitzar les CUS, malgrat que la qualitat en algunes zones és baixa i, per tant, difícil de fotointerpretar. Aquestes fotografies aèries també presenten força distorsions a causa de la geometria cònica de la captació i de l'escassa elevació de la plataforma des de la qual es capten: els avions. A més, les escales són aproximades si no es fa un procés d'ortorectificació.

Des d'aleshores, però, cal ressaltar la millora en la qualitat de les imatges i els diversos tractaments cromàtics (color natural, infraroig color, etc.) que han donat lloc a excel·lents productes com els ortofotomapes de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), produïts majoritàriament en el darrer decenni. Un ortofotomapa consisteix en una fotografia aèria vertical rectificadada mantenint una escala uniforme (o gairebé) per a tota la imatge i amb informació toponímica, etc., sobreposada (ICC, 2002). Entre 1986 i 1992 es realitzà la primera versió de la sèrie en blanc i negre 1:5 000 i entre 1994 i 1995 la versió 1:25 000 en color natural, que abasta tot Catalunya amb 304

fulls basats en una única data de vol (1993). Actualment, s'està fent la tercera versió de 1:5 000 en color, mentre que la darrera versió de 1:25 000 és la del període 1999-2003.

Un altre aspecte que cal considerar és l'elevat cost de fer un vol fotogramètric, d'aquí que en molts casos els vols no cobreixen tot Catalunya sinó determinades àrees (consulteu la fototeca de l'ICC per a més informació: <http://www.icc.es/maps/vols/ccvols.html>) o no tenen una unicitat temporal ni tan sols anual, com passa en les darreres sèries de l'ICC que no ofereixen el mateix any per a tot el país. Per tant, la resolució temporal de les fotografies aèries pot no ser la més adequada per a determinats objectius.

En general, els productes obtinguts de la fotointerpretació de fotografies aèries poden tenir llegendes més o menys exhaustives segons els objectius. Per exemple, el *Mapa Topogràfic Nacional* realitzat per la Direcció General de l'Institut Geogràfic Nacional (IGN) a escala 1:25 000 amb informació de vols aeris realitzats a mitjan dels anys setanta (malgrat que la primera edició és dels vuitanta) diferencia diversos conreus i superfícies forestals (per a més informació vegeu IGN, 2001).

Potser l'exemple més representatiu de producte provinent de fotointerpretació a escala nacional és el *Mapa de Cultivos y Aprovechamientos* (MCA) a escala 1:50 000 encarregat pel Ministeri d'Agricultura, Pesca i Alimentació (MAPA) des de mitjan dels anys setanta (disponible a: <http://mediambient.gencat.net/cat/inici.jsp>), amb una llegenda força exhaustiva i jerarquitzada (dinou CUS en el nivell menys estratificat i més de setanta en el més detallat). A hores d'ara, l'MCA segueix sent l'única cartografia, a aquesta escala i per a tot l'Estat espanyol, que recull la distribució de les CUS. La primera edició de l'MCA és el resultat de la restitució analògica de la fotointerpretació d'un vol aeri en blanc i negre a

escala 1:30 000 i d'un amplíssim treball de camp. Com des del MAPA es reconeix, el mètode de restitució analògica comporta l'existència de més desplaçaments, distorsions, etc., comparat amb els treballs realitzats amb mètodes digitals. Per aquest motiu des del 1999 s'està duent a terme l'actualització de l'MCA per mitjà de la fotointerpretació en pantalla d'ortofotos digitals elaborades a partir d'un vol aeri a escala 1:40 000 i del suport d'imatges de satèl·lit i del treball de camp en les zones més dubtoses.

Pel que fa a Catalunya, la cartografia amb més resolució espacial de CUS és el *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya* (Burriel *et al.*, 2001), realitzada pel Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) a partir de la fotointerpretació i digitalització en pantalla a escala 1:3 500 de les ortofotos digitals en color 1:25 000 de l'ICC (vol de 1993, amb un píxel de 2,5 m), on es diferenciaven vint-i-una CUS (vegeu tota la informació i la disponibilitat de les capes digitals a: <http://www.creaf.uab.es/mcsc/>). Actualment, s'està actualitzant la versió del 1993 a partir de les ortofotos de l'ICC del període 2000-2003.

La *Cartografia d'Hàbitats de Catalunya*, duta a terme des de la Universitat de Barcelona, és un altre producte que cobreix tot el territori català. Combinant la fotointerpretació dels ortofotomapes 1:25 000 en color i l'infraroig color de l'ICC amb un exhaustiu treball de camp, aquesta cartografia aporta una informació temàtica molt significativa, amb més de 250 hàbitats naturals, seminaturals i antròpics, a escala 1:50 000 (<http://www.gencat.es/mediamb/pn/2chabitats-2.htm>).

Finalment, cal esmentar que la fotointerpretació de fotografies aèries pot comportar un elevat grau de subjectivitat i una gran despesa de temps, a diferència, com veurem seguidament, de les imatges de satèl·lit que permeten classificacions automàtiques. En aquest sentit, tradicionalment no s'han realitzat tests objec-

tius sobre la qualitat dels resultats obtinguts, mentre que amb imatges de satèl·lit sí que s'ha fet (Khorram, 1999).

Teledetecció amb imatges satèl·lit

La teledetecció amb imatges de satèl·lit ha adquirit en els darrers anys una gran importància com a tècnica aplicada a l'observació de la Terra. El 23 de juliol de 1972, després d'anteriors experiències en l'observació meteorològica (TIROS el 1960, etc.) i en d'altres camps, els EUA llançaren el primer satèl·lit d'observació terrestre de la sèrie Landsat, anomenat en aquell moment *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS). Des d'aleshores se n'han llançat sis versions més (la més recent, el Landsat-7, l'abril del 1999) amb diferents sensors a bord. El sensor més emprat ha estat el *Multispectral Scanner* (MSS), instal·lat des del Landsat-1 fins al Landsat-5, que es caracteritzava pel fet de recollir les dades en quatre canals espectrals (de 0,5 a 1,1 μm) i una mida de píxel nominal de 57 m \times 79 m. El segon sensor més emprat ha estat el *Thematic Mapper* (TM), instal·lat en els Landsat-4 i 5, que recollia dades en set canals espectrals (tres visibles de 0,45 a 0,69 μm , tres infraroigs de 0,76 a 2,35 μm , i un canal tèrmic de 10,4 a 12,5 μm) i una mida de píxel nominal de 30 m \times 30 m. El Landsat-7 té instal·lat el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), que té la mateixa configuració que el TM, però amb l'addició d'un canal pancromàtic (de 0,52 a 0,9 μm) amb un píxel de 15 m \times 15 m.

El 1986 es llançà el primer satèl·lit francès de la sèrie *Système Pour l'Observation de la Terre* (SPOT-1), que es va actualitzar el 1990, 1993 i 1998. El sensor més emprat ha estat el *Haute Résolution Visible* (HRV) embarcat des de l'SPOT-1 a l'SPOT-3 amb quatre canals per recollir dades (dos del visible de 0,5 a

0,68 μm , un infraroig de 0,78 a 0,89 μm i un pancromàtic de 0,5 a 0,73 μm) amb una mida de píxel de 20 m \times 20 m, i 10 m \times 10 m en el pancromàtic. L'SPOT-4 inclou un nou canal en l'infraroig mitjà (de 1,58 a 1,75 μm) i un nou sensor anomenat *Végétation* amb quatre canals espectrals (tres visibles de 0,43 a 0,89 μm i un infraroig de 1,58 a 1,75 μm) i amb una mida de píxel d'1 km², útil per a estudis de grans extensions territorials. El maig del 2002 es llançà l'SPOT-5 amb una millora de la mida de píxel: de 5 m \times 5 m en el pancromàtic, i de 10 m \times 10 m en els visibles i en l'infraroig proper.

Hi ha altres satèl·lits amb llarga tradició, com la sèrie de l'*Indian Remote Sensing Satellite* (IRS) iniciat el 1988, o el *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) iniciat amb aquest nom el 1979. Més recentment, han aparegut tot un grup de satèl·lits d'alta resolució com el *Quickbird*, llançat el 2001, amb una mida de píxel de 61 cm \times 61 cm en el canal pancromàtic i de 2,5 m \times 2,5 m en els multiespectrals, o l'*Ikonos-2* llançat el 1999 amb una resolució d'1 m \times 1 m en el canal pancromàtic i de 4 m \times 4 m en el canal multiespectral.

Mitjançant imatges de satèl·lit es poden obtenir mapes de CUS emprant tres mètodes: el primer és seguir una classificació supervisada, és a dir, usar àrees d'entrenament (polígons característics de les CUS d'interès); el segon és mitjançant una classificació no supervisada, on grups de píxels que tenen un comportament espectral homogeni (classes espectrals) són agrupats automàticament; finalment, hi ha els mètodes mixtos que combinen ambdues metodologies (Chuvieco, 2002). Un cop obtinguts els mapes de CUS d'interès, cal especificar quina és l'exactitud temàtica obtinguda a través de les anomenades «matrius de confusions», on es comparen els resultats amb noves àrees d'entrenament (diferents de

les usades en la classificació i conegudes com a àrees de test o veritat-terreny; Khorram, 1999).

Els avantatges de les imatges de satèl·lit en l'anàlisi de les CUS respecte a les fotografies aèries són: l'elevada resolució temporal que implica la disponibilitat d'imatges periòdiques de les àrees d'interès (per exemple, en el cas de Landsat passa cada setze dies). Aquest fet permet, si no hi ha núvols, observar fenòmens dinàmics, com per exemple els canvis fenològics de la vegetació, i analitzar-los multitemporalment (Stuttard, 1992), tal com s'ha esmentat anteriorment. Les imatges de satèl·lit presenten una resolució espectral més precisa que les imatges aèries, tradicionalment en blanc i negre, ja que són relativament escassos els vols en color i, encara més escassos, els vols infraroig. A més, el format tradicionalment digital i molt més fàcilment georeferenciable de les imatges de satèl·lit en facilita el tractament. Malgrat que actualment comencen a estar disponibles imatges aèries digitals, la seva geometria continua tenint una problemàtica més gran a causa de la major inestabilitat i l'alçada més petita de la plataforma.

Tradicionalment, un dels desavantatges de treballar amb imatges de satèl·lit ha estat el seu relatiu elevat cost. Diem relatiu ja que, com Chuvieco (2002) esmenta, el cost ha anat disminuint a mesura que s'ha incrementat el nombre d'usuaris, projectes, etc. i, a més, s'ha de tenir en compte la coberta global i exhaustiva de la superfície terrestre, l'observació multiescala, la informació sobre diverses regions de l'espectre electromagnètic, la repetitivitat i el format digital. De totes maneres, s'ha de reconèixer que en alguns casos el cost pot motivar recances a l'hora d'emprar imatges satèl·lit, sobretot en els casos en els quals es necessita molta resolució espacial (per exemple mides de píxel d'un metre) o es treballa amb àrees d'estudi grans (per exemple tota la costa catalana).

A escala europea hi ha multitud de projectes en els quals s'empren imatges de satèl·lit. Així, per exemple, el 1985 la Comissió Europea va promoure el programa *Coordination of Information on the Environment* (CORINE) amb l'objectiu d'inventariar, coordinar i comptabilitzar la informació de l'estat del medi ambient i dels recursos naturals dins la Comunitat. El subprojecte *CORINE Land Cover* pretenia localitzar les CUS dels dotze estats membres del Mercat Comú per mitjà de la fotointerpretació d'imatges del satèl·lit Landsat-5 captades amb el sensor *Thematic Mapper* (TM), l'any 1987. La llegenda s'estructurà jeràrquicament en tres nivells estàndard per a tot Europa; el tercer nivell comprèn quaranta-quatre classes, ampliable segons les característiques de cada estat (Fuller & Brown, 1996). Actualment, s'està duent a terme l'actualització del *CORINE Land Cover* per a l'any 2000 (Perdigao & Annoni, 1997; IGN, 2002). Tot i que alguns autors han plantejat l'ús d'aquesta base a escala 1:100 000, la realitat és que un ús cartogràficament rigorós només es pot fer a escala 1:250 000.

Un altre exemple d'aplicació de la teledetecció a escala europea és el projecte *Monitoring Agriculture with Remote Sensing* (MARS), iniciat el 1988 i dut a terme pel *Joint Research Centre* situat a Ispra (Itàlia). L'objectiu principal era iniciar una metodologia per inventariar àrees conreades i obtenir estimacions de les productivitats agrícoles dels estats membres (Perdigao *et al.*, 1995).

Com s'ha esmentat anteriorment, el coneixement de les superfícies destinades a les diverses CUS, la seva distribució i evolució en el temps, es configura com a una de les eines bàsiques en la planificació i gestió integral del territori. Per aquest motiu, l'Institut Cartogràfic de Catalunya confecciona el *Mapa d'Usos del Sòl de Catalunya* a 1:250 000 a partir d'imatges del satèl·lit Landsat-5, captades pel sensor TM, durant el 1987 (s'ha actu-

alitzat el mapa el 1992 i el 1997), amb una llegenda de vint CUS (Viñas & Baulies, 1995; es poden consultar a: http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/cartografia/fitxes/inici.jsp).

Anàlisi dels canvis en les CUS

Un cop obtinguts els mapes de CUS (de qualsevol data, àrea d'estudi, escala i llegenda, i a través de qualsevol de les fonts esmentades), un possible objectiu pot ser l'anàlisi dels canvis, és a dir, localitzar i quantificar (fent ús de la matriu de canvis o de transicions; vegeu la taula 4) la superfície de canvi de cada CUS en un període determinat (per exemple, 1980-2000). El mètode actualment més emprat és la comparació postclassificació (Congalton & Macleod, 1994), o sigui, la superposició de mapes classificats finals mitjançant un SIG.

Tenim multitud d'exemples de comparacions postclassificacions amb mapes de CUS obtinguts amb treball de camp (i GPS), amb fotografia aèria o amb imatges de satèl·lit. Amb fotografia aèria es pot esmentar el treball de Camarasa *et al.* (1979), on s'analitzen els canvis entre 1965 i 1973 a la comarca de Barcelona (hi inclouen els vint-i-set municipis que formaven part de la Corporació Metropolitana de Barcelona); la comparació es fa per mitjà d'11.000 punts extrets d'una malla sobreposada a l'àrea d'estudi. Els resultats, extrets de la matriu de transicions, mostren el creixement de les zones urbanitzades, el descens dels conreus, l'augment del bosc, etc., i posen ja de manifest les tendències que actualment caracteritzen l'àrea de Barcelona.

A Pavón *et al.* (2002) es presenta un altre exemple de superposició de mapes de CUS (en aquest cas amb polígons) obtinguts amb fotografia aèria; en concret s'analitzen els canvis soferts en una zona de l'Alt Empordà entre 1956 i 1995. La matriu de transicions

TAULA 1. Imatges de satèl·lit i material addicional digital per als anys setanta.
Remote sensing images and digital ancillary data for the 1970s.

<i>Títol</i>	<i>Font</i>	<i>Any</i>	<i>Escala</i>	<i>Fulls</i>	<i>Observacions</i>
Landsat-2 MSS	CREAF	13/07/1977 13/06/1978 18/09/1978	Pixel de 60 m × 60 m		Digital
<i>Mapa Topogràfic Nacional</i>	Institut Geogràfic Nacional (IGN)	1985	1:25 000	258	Vol fotogràmic 1972
<i>Mapa de Cultivos y Aprovechamientos</i>	Ministeri d'Agricultura, Pesca i Alimentació	1978	1:50 000	258, 296 i 297	Format digital vectorial
Fotos aèries	IGN	1972-1973	1:30 000 (aprox.)	296 i 258	Escanejades
Fotos aèries	CETFA (companyia privada)	1977	1:8 000 (aprox.)	258	Escanejades
Fotos aèries	Aeropost, SA	1976	1:8 000 (aprox.)	56397-56399, 56410- 56428, 56387-56396	Escanejades

TAULA 2. Imatges satèl·lit i material addicional digital per als anys noranta.
Remote sensing images and digital ancillary data for the 1990s.

<i>Títol</i>	<i>Font</i>	<i>Any</i>	<i>Escala</i>	<i>Fulls</i>	<i>Observacions</i>
Landsat-5 MSS	CREAF	28/06/1993 31/08/1993	Pixel de 60 m × 60 m		Digital
Landsat-5 TM	Departament de Geografia UAB	22/05/1991 19/07/1992 03/05/1996 09/07/1997 11/09/1997	Pixel de 30 m × 30 m		Digital
<i>Mapa Topogràfic de l'Alt Empordà</i> (ICC)	Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)	1996	1:50 000	219, 220, 258, 259 i 256	Format digital vectorial
<i>Mapa Topogràfic de l'Alt Empordà</i> (ICC)	ICC	1995	1:5 000	219, 220, 258, 259 i 256	Format digital vectorial
Ortofotomapes	ICC	1993	1:50 000	219, 220, 258, 259 i 256	Format digital de trama. Pixel 2 m × 2 m i 24 bits de color
Fotos aèries infraroig color	ICC	1997	1:60 000	219 i 220	Format digital. Pixel 2,5 m × 2,5 m
Paratge Natural d'Interès Nacional de l'Albera	ICC	1999	1:25 000		Format analògic

TAULA 3. Matriu de confusions de les CUS de 1997, en píxels.
Confusion matrix of LCLU from 1997, in pixels.

CUS 1997	Veritat-terreny																				
	Arròs	Gira-sol	Blat de moro	Resta regadiu	Blat de moro	Gira-sol	Arròs	Cereals hivern	Fruïters	Oliveres	Vinyes	Matolls	Caducifolis	Esclerofil·les	Prats	Urbà	Sòl nu	Rius i llacunes	Total	Error d'omissió	Exactitud productor
Arròs	219	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	219	0,0	100,0
Gira-sol	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	10,9	89,1
Blat de moro	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0,0	100,0
Resta regadiu	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0,0	100,0
Cereals hivern	0	0	0	0	368	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	398	7,5	92,5
Fruïters	0	0	1	0	0	377	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	378	0,3	99,7
Oliveres	0	0	0	0	0	0	113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113	0,0	100,0
Vinyes	0	0	0	0	0	0	0	201	0	0	201	0	0	0	0	0	0	0	201	0,0	100,0
Matolls	0	0	0	0	0	0	46	0	0	25	405	0	183	35	0	0	0	0	694	41,6	58,4
Caducifolis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	664	2	0	0	0	0	0	666	0,3	99,7
Esclerofil·les	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	670	0	0	0	0	0	689	2,8	97,2
Prats	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	233	0	0	0	0	236	1,3	98,7
Urbà	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0	0	0	160	0,0	100,0
Sòl nu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	147	0	147	0,0	100,0
Rius i llacunes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106	106	0,0	100,0
Total	219	41	78	28	419	377	113	256	408	683	855	268	160	147	106						
Error d'omissió	0,0	0,0	1,3	0,0	12,2	0,0	0,0	21,5	0,7	2,8	21,6	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Exactitud productor	100,0	100,0	98,7	100,0	87,8	100,0	100,0	78,5	99,3	97,2	78,4	86,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			

TAULA 4. Matriu de transicions del 1977 al 1993, en hectàrees.
Transition matrix from 1991 to 1997, in ha.

		1977													
1993		Blat de moro	Resta regadiu	Cereals hivern	Fruiters	Vinyes	Oliveres	Matolls	Caducifolis	Esclerofil·les	Prats	Sup. urbana	Sòl nu	Rius	Total
Blat de moro		200,9	587,2	1.517,8	78,1	38,9	13,7	60,1	13,7	19,4	490,3	0,0	41,0	0,0	3.061,1
Resta regadiu		131,4	429,5	1.134,0	58,0	27,7	16,6	52,6	1,4	4,3	433,8	0,0	34,2	0,0	2.323,4
Cereals hivern		422,6	940,7	5.895,7	72,4	1.258,2	448,9	846,0	10,8	20,2	798,1	0,0	369,4	1,1	11.084,1
Fruiters		56,9	181,4	311,8	94,0	6,5	1,1	34,2	5,0	7,2	152,3	0,0	8,3	0,7	859,3
Vinyes		11,2	19,1	331,6	1,8	933,8	13,7	36,4	0,0	0,7	6,1	0,0	29,5	0,0	1.383,8
Oliveres		0,0	1,4	9,0	0,0	3,6	426,2	15,1	0,0	0,4	0,7	0,0	0,7	0,0	457,2
Matolls		26,3	78,8	658,4	18,7	316,1	702,7	4.557,6	29,9	1.208,5	794,9	0,0	69,1	9,4	8.470,4
Caducifolis		4,7	10,1	30,6	2,5	1,1	0,7	5,0	1.154,5	659,9	268,2	0,0	0,4	0,0	2.137,7
Esclerofil·les		1,4	4,3	34,6	3,2	4,0	22,3	844,9	439,2	6.192,0	627,5	0,0	2,5	0,0	8.176,0
Prats i pastures		64,8	177,8	1.153,8	16,2	48,2	207,7	950,0	25,6	117,7	815,0	0,0	78,8	1,4	3.658,0
Sup. urbana		10,4	59,8	384,8	3,6	11,9	29,9	55,1	0,4	4,0	40,7	665,3	63,0	5,8	1.334,7
Sòl nu		19,1	30,6	148,7	4,0	32,0	2,2	21,2	0,7	9,7	25,2	0,0	148,7	1,4	443,5
Rius i llacunes		0,7	0,4	15,8	0,4	0,4	2,5	19,1	0,4	1,8	37,1	0,0	16,6	28,8	123,8
Total		950,4	2.521,1	11.626,6	352,8	2.682,4	1.888,2	7.497,4	1.681,6	8.245,8	4.489,9	665,3	862,2	48,6	43.512,3

TAULA 5. Matriu de transicions del 1991 al 1997, en hectàrees.
Transition matrix from 1991 to 1997, in ha.

		1991															
1997		Arròs	Gira-sol	Blat de moro	Resta regadiu	Cereals hivern	Fruiters	Vinyes	Oliveres	Matolls	Caducifolis	Esclerofil·les	Prats	Sup.urbana	Sòl nu	Rius	Total
Arròs		42,8	0,0	13,1	6,5	117,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,1	0,9	0,0	4,1	0,0	186,6
Gira-sol		2,0	329,2	240,4	187,8	1.020,3	72,8	1,0	53,7	118,4	0,0	16,4	31,2	0,0	33,3	0,8	2.106,8
Blat de moro		0,3	0,0	1.257,7	288,8	1.100,5	164,5	1,4	78,2	85,8	1,2	27,4	29,8	0,0	55,5	0,1	3.091,2
Resta regadiu		0,5	0,3	245,3	208,4	563,1	74,2	0,6	63,4	143,6	0,3	13,5	32,3	0,0	237,6	15,0	7.709,8
Cereals hivern		5,6	0,1	991,6	515,3	4.525,8	222,2	5,0	401,9	632,2	0,2	28,8	128,5	0,0	237,6	15,0	7.709,8
Fruiters		0,4	0,0	112,4	138,6	191,0	197,8	2,4	31,8	76,0	0,3	6,0	52,0	0,0	7,7	0,9	817,8
Oliveres		0,0	0,0	1,5	1,9	10,3	0,3	504,8	1,7	12,9	0,0	0,4	1,8	0,0	0,0	0,0	535,6
Vinyes		0,0	0,0	79,8	91,6	1.007,6	34,4	5,2	314,1	367,6	0,0	8,2	36,3	0,0	10,0	0,2	1.955,1
Matolls		25,8	0,0	149,4	305,0	1.206,7	95,9	9,5	414,1	4.875,9	17,9	1.297,4	1.063,1	0,0	16,9	11,0	9.488,6
Caducifolis		0,0	0,0	45,8	43,0	62,7	26,8	0,4	6,0	375,0	1.245,3	666,3	70,2	0,0	6,2	0,2	2.548,0
Esclerofil·les		0,0	0,0	6,8	4,9	29,9	6,6	0,3	2,6	1.431,1	877,3	7.217,8	53,9	0,0	7,0	0,0	9.638,2
Prats		15,9	0,0	184,4	133,3	422,5	42,2	2,2	232,7	520,2	67,6	136,8	610,5	0,0	15,4	21,8	2.405,5
Sup.urbana		0,0	0,0	3,0	6,6	57,7	1,3	0,0	1,8	7,8	0,2	0,6	10,0	1.176,8	37,5	0,4	1.303,9
Sòl nu		0,0	0,0	2,2	0,4	31,2	1,6	0,0	2,0	12,2	2,2	2,4	3,7	0,0	211,0	8,8	277,7
Rius i llacunes		0,0	0,0	0,9	0,5	3,1	0,1	0,0	0,3	6,9	0,5	6,0	21,6	0,0	1,7	59,8	101,4
Total		93,3	329,7	3.334,2	1.932,7	10.349,5	939,8	532,9	1.604,1	8.667,7	2.213,0	9.428,1	2.145,7	1.176,8	654,8	119,6	43.521,9

mostra el descens de l'ocupació de les vinyes i oliveres, l'augment del sòl urbà, etc.

La superposició de mapes classificats finals té, però, algunes fonts d'incertesa (Serra *et al.*, 2003):

a) Registre erroni de la frontera dels polígons en els diferents mapes. Aquest fet dona lloc, en format vectorial, al que es coneix com a escltxes (*slivers*, en anglès), polígons estrets de dubtosa interpretació (Christman, 1987) fruit del mal coregistre de les fonts. Aquest problema es pot produir amb més freqüència en el cas de mapes provinents de la fotointerpretació de fotografies aèries de diferents anys i, possiblement, a escales diferents.

b) Problemes derivats dels errors de classificació perquè un o tots dos polígons estan erròniament etiquetats, i això provoca canvis positius falsos, quan els canvis són ficticis, o canvis negatius falsos, quan no han estat identificats però realment s'han donat. D'altra banda, la comparació postclassificació requereix una gran exactitud temàtica dels mapes de CUS independents, ja que l'exactitud del mapa de canvis és el producte de multiplicar les exactituds de cadascun individualment (Singh, 1989).

Un segon mètode és l'anàlisi simultània de dades multitemporals, és a dir, s'obtenen els canvis directament sense necessitat de sobreposar mapes classificats. En la teledetecció amb imatges de satèl·lit es presenta sota diversos procediments, com ara la resta d'índex de vegetació (Salvador *et al.*, 2000), l'anàlisi de components principals de les imatges originals preses en conjunt (Fung & LeDrew, 1987; Eastman & Fulk, 1993) o l'anàlisi dels vectors de canvi (Lambin & Strahler, 1994). En tots aquests, la premissa bàsica és que els canvis en les CUS són el resultat dels canvis en les reflectàncies, que han de ser més grans que els causats per altres factors com les dife-

rents condicions atmosfèriques, l'angle solar, la humitat del sòl o la calibració del sensor. Un altre problema relacionat amb aquest segon mètode és que normalment parteixen de llegendes amb molt poques categories de canvi (Michalak, 1993) i és molt problemàtic establir el llindar a partir del qual es discrimina un canvi d'un no-canvi.

L'anàlisi dels canvis de les CUS mitjançant imatges de satèl·lit: l'exemple de l'Alt Empordà

L'exemple que es presenta a continuació correspon a l'anàlisi dels canvis (entre 1977 i 1997) en les CUS de vint-i-un municipis de l'Alt Empordà realitzada des del Departament de Geografia de la Universitat Autònoma de Barcelona (Serra, 2002). El treball s'ha basat en la classificació automàtica d'imatges de satèl·lit, encara que també s'han fet servir altres fonts d'informació complementàries. Tot el material digital emprat, tant pel que fa als anys setanta com als noranta, es resumeix a les taules 1 i 2.

Les imatges de satèl·lit disponibles corresponen a sensors diferents (MSS disponible al Landsat-2 i 5 i TM només disponible a partir del Landsat-5) i, per tant, els mapes de CUS obtinguts d'aquestes no tenen la mateixa mida de píxel (60 m × 60 m i 30 m × 30 m, respectivament). Per aquest motiu no es van poder quantificar els canvis de CUS sobreposant el mapa de 1977 al de 1997, sinó que primer es van quantificar els obtinguts amb MSS entre 1977 i 1993, i amb TM entre 1991 i 1997 posteriorment.

El primer pas va ser aplicar una correcció geomètrica de les imatges per tal d'eliminar les distorsions provocades pel moviment del satèl·lit, per la rotació i curvatura terrestres, pel relleu, etc., així com per tenir georeferenciades totes les imatges a un mateix sistema

de referència (UTM). Per saber el desplaçament de posició de les imatges respecte a una font veritat-terreny s'empra l'error *Root Mean Square* (RMS) o desviació estàndard dels errors en x i y (Palà & Pons, 1995). Tots els valors RMS obtinguts estaven per sota de la mida d'un píxel.

Les imatges també van ser corregides radiomètricament mitjançant el mètode de Pons i Solé-Sugrañes (1994), amb l'objectiu de disposar d'uns valors propers als que s'obtidrien en el cas d'una recepció perfecta, expressats en reflectàncies, després d'eliminar els efectes atmosfèrics i d'il·luminació solar.

Per a l'establiment de la llegenda es va considerar que l'àrea d'estudi és eminentment agrícola i, per tant, la llegenda adoptada havia de reflectir aquest fet, i, d'altra banda, calia aprofitar la informació multispectral i multitemporal per intentar diferenciar conreus diferents. Les CUS per a les classificacions amb MSS (1977 i 1993) inclogueren el blat de moro de regadiu, la resta d'herbacis de regadiu, els cereals d'hivern, els fruiters, les oliveres, les vinyes, els matolls, els caducifolis, els esclerofil·les, els prats i pastures, la superfície urbana, el sòl nu, i els rius i llacunes. Per a les classificacions amb TM (1991 i 1997) van ser les mateixes CUS més l'arròs, reintroduït el 1985, i el gira-sol, conreat sobretot a partir dels subsidis de la Política Agrària Comuna (PAC), vigents a l'Estat espanyol des del 1986.

Tal com s'ha esmentat anteriorment, les imatges de satèl·lit es poden classificar automàticament. El mètode usat en el nostre cas va ser el del classificador mixt implementat en el programa MiraMon (Serra *et al.*, 2003). El mètode requereix la introducció de les àrees d'entrenament, és a dir, els polígons característics de cadascuna de les CUS, i una classificació no supervisada, o sigui, el programa crea automàticament grups de píxels amb va-

lors semblants (Chuvieco, 2002). En la fase d'obtenció de les àrees d'entrenament (fase d'ajust), l'aportació del treball de camp (realitzat amb ortofotomapes) i del material addicional digital va ser de gran utilitat per interpretar i classificar millor les CUS. En aquest sentit, cal esmentar la particular problemàtica de les àrees urbanes a causa de la combinació de cobertes diferents que poden presentar: zones arbrades, etc. Per aquesta raó la superfície urbana es va fotointerpretar per a cadascun dels anys amb fotografia aèria.

Un vegada obtinguts els quatre mapes, un per a cada subperíode d'interès (1977, 1993, 1991 i 1997), la següent fase va ser l'obtenció de les matrius de confusió (vegeu-ne un exemple a la taula 3), per contrastar l'exactitud temàtica de cadascun dels mapes amb l'aplicació d'àrees d'entrenament noves (de test), i va ser de gran ajut, també, el treball de camp i el material addicional. En la taula s'observa la fiabilitat de cadascuna de les CUS per separat; a partir d'aquesta es quantifiquen els encerts globals que foren del 95,7 % per al 1977, del 88 % per al 1993, del 93,8 % per al 1991 i del 91,6 % per al 1997. Com s'observa, tots van ser > 85 %, normalment el llindar mínim acceptat (Khorram, 1999).

Un cop conegudes les fiabilitats temàtiques dels mapes de CUS, el següent pas va ser sobreposar els mapes de 1977 i 1993 i de 1991 i 1997 per obtenir els mapes de canvis. El mapa de canvis de les CUS de 1977-1993 té una fiabilitat temàtica del 84,2 % ($95,7 \% \cdot 88 \%$), mentre que el del 1991-1997 del 85,9 % ($93,8 \% \cdot 91,6 \%$), és a dir, la multiplicació de les fiabilitats individuals tal com s'ha esmentat anteriorment. Aquestes xifres, però, no tenen en compte els possibles problemes de coregistre presents a les vores entre polígons; per a una anàlisi més detallada consulteu Serra *et al.* (2003).

Els processos de canvi detectats en els vint-i-un municipis analitzats, en el transcurs

dels vint anys analitzats, han estat bàsicament tres (vegeu les taules 4 i 5; en la diagonal apareixen les hectàrees sense canvi): des d'un punt de vista forestal, els canvis més significatius han estat l'aforestació natural, d'una banda, fruit de la reconversió i abandonament de vinyes i oliveres, i de prats i pastures (molt marcadament en el període 1977-1993) i, d'altra banda, l'increment del matollar a causa, també, de l'abandonament agrari i dels incendis forestals.

Des d'un punt de vista agrari, el canvi més important ha estat l'increment d'aquells conreus herbacis més protegits per la Política Agrària Comuna, és a dir, el blat de moro de regadiu (sobretot en el període 1977-1993), l'arròs i el gira-sol (el 1997 amb una superfície set vegades més gran que el 1991), en detriment d'altres herbacis de regadiu i, principalment, dels cereals d'hivern.

Finalment, s'ha pogut analitzar el creixement urbanístic, localitzat essencialment a la zona costanera, amb la consolidació de la macro-urbanització Empuriabrava, i la proliferació i creixement de càmpings i urbanitzacions.

Conclusions

Des de l'aixecament planimètric a mà alçada de les parcel·les del cadastre fins a les imatges de satèl·lit, la cartografia de les CUS ha evolucionat extraordinàriament. La localització i quantificació sistemàtica de l'ocupació de les CUS amb treball de camp ha estat històricament inexacta, però la tècnica del Sistema de Posició Global (GPS) ha permès millorar significativament l'ús d'aquesta eina. De tota manera, l'elevat cost en temps determina que per a grans àrees d'estudi es requereixin altres fonts com la fotografia aèria.

Malgrat l'important avenç que ha representat la fotografia aèria respecte al treball de camp (visualització d'àrees de difícil accés,

etc.) i la millora de la seva qualitat (en color, etc.), aquesta presenta alguns problemes: l'escassa resolució temporal (només es disposen de determinats vols, de dia, mes i any específics); la distorsió a causa de la geometria cònica de la captació; l'error d'escala si no es fa un procés d'ortorectificació; l'elevada despesa de temps que sol requerir la fotointerpretació (segons, però, la superfície de l'àrea d'estudi i de la llegenda); o la subjectivitat del fotointerpretador, ja que no es fan, en general, tests objectius que indiquin la qualitat dels resultats obtinguts.

L'ús de les imatges de satèl·lit ha permès millorar alguns d'aquests problemes: es pot disposar d'imatges periòdiques de les àrees d'interès, proporcionen informació multi-espectral (d'aquí que es pugui discriminar tipus de conreus, per exemple), o el seu format digital facilita treballar amb classificacions automàtiques. Malgrat aquests avantatges, les imatges de satèl·lit poden representar uns costos econòmics elevats en determinats estudis, depenent de la mida de píxel i de la superfície de l'àrea d'estudi. També cal esmentar els problemes de confusió que comporten determinades cobertes com les zones urbanes.

La superposició de mapes per mitjà d'un SIG és el mètode més emprat per obtenir mapes de canvis de CUS. Per realitzar una anàlisi fiable primer cal partir de mapes individuals tan acurats com sigui possible, ja que sinó els canvis poden ser ficticis. La fiabilitat temàtica de les classificacions automàtiques realitzades amb imatges de satèl·lit es contrasten amb les matrius de confusió. La validesa del mapa de canvis, fruit de la superposició, serà el resultat de la multiplicació de les fiabilitats individuals.

En resum, es pot argumentar que les imatges de satèl·lit, fins a un determinat moment, han servit per analitzar territoris més extensos amb unes llegendes més generals, mentre que les fotografies aèries s'han emprat per a anàli-

sis més fines. Actualment, però, aquesta distinció no té sentit gràcies als nous sensors, en alguns casos amb una resolució espacial comparable a la de les fotografies aèries. De tota manera, la combinació de la informació provinent del treball de camp, de les fotografies aèries i de les imatges de satèl·lit mitjançant un SIG és la veritable revolució en la localització de les CUS, tal com s'ha reflectit en el cas de l'estudi de l'Alt Empordà.

Bibliografia

- BADIA, A. 2000. *La incidència dels incendis forestals a l'Àrea Metropolitana de Barcelona i a la comarca del Bages durant el període 1987-1998*. Departament de Geografia. Universitat Autònoma de Barcelona. [Tesi doctoral inèdita]
- BOUMA, J.; VARALLYAY, G.; BATJES, N. H. 1998. Principal land use changes anticipated in Europe. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 67: 103-119.
- BURRIEL, J. A.; IBÁÑEZ J. J. & PONS, X. 2001. El Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña: herramienta para la gestión y la planificación territorial. In: *Montes para la sociedad del nuevo milenio. III Congreso Forestal Español*. (Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente. Ed.). Coria Gráfica. Sevilla. Vol. 3. p. 83-89.
- CAMARASA, J. M.; FOLCH, R. & MASALLES, R. M. 1979. *El patrimonio natural de la comarca de Barcelona. Medidas necesarias para su protección y conservación. Los recursos renovables terrestres*. Corporación Metropolitana de Barcelona.
- CONGALTON, R. G. & MACLEOD, R. D. 1994. Change detection accuracy assessment of the NOAA Chesapeake bay pilot study. *International Symposium on the spatial accuracy of natural resource data bases*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Virginia. p. 78-87.
- CHRISMAN, N. R. 1987. The accuracy of map overlays: a reassessment. *Landscape Urban Plan.*, 14: 427-439.
- CHUVIECO, E. 2002. *Teledetección ambiental*. Ariel. Barcelona.
- EASTMAN, J. R. & FULK, M. 1993. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 59: 1309-1312.
- EUROPEAN COMMISSION 1998. *Remote Sensing of Mediterranean desertification and environmental changes (RESMEDES)*. Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburg.
- FERNÁNDEZ, F. 1998. Las primeras aplicaciones civiles de la fotografía aérea en España. 1: El Catastro y las Confederaciones Hidrográficas. *Eria*, 46: 117-130.
- FISCHER, G. 1998. Entenent el canvi. L'ús de models integradors. In: *Medi ambient. Tecnologia i Cultura*, 21. Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. Barcelona. p. 15-25
- FULLER, R. & BROWN, N. 1996. A CORINE map of Great Britain by automated means. Techniques for automatic generalization of the land cover map of Great Britain. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 10: 937-953.
- FUNG, T. & LEDREW, E. 1987. Application of principal components analysis to change detection. *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 53: 1649-1658.
- IHSE, M. 1995. Swedish agricultural landscapes – patterns and changes during the last 50 years, studied by aerial photos. *Landscape Urban Plan.*, 31: 21-37.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA (ICC). 2002. *Full informatiu de l'Institut Cartogràfic de Catalunya*, 16. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN). 2001. *Boletín Informativo del Instituto Geográfico Nacional*, 6. Centro Nacional de Información Geográfica. Madrid.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN). 2002. *Boletín Informativo del Instituto Geográfico Nacional*, 9. Centro Nacional de Información Geográfica. Madrid.
- KHORRAM, S. (Ed.). 1999. *Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Maryland (USA).
- LAMBIN, E. F. & STRAHLER, A. H. 1994. Change vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal resolution satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 48: 231-244.
- LUDEVID, M. 1995. *El canvi global en el medi ambient*. Biblioteca Universitària, 25. Universitat Pompeu Fabra. Barcelona.
- MICHALAK, W. Z. 1993. GIS and land use change analysis: integration of remotely sensed data into GIS. *Appl. Geogr.*, 13: 28-44.
- PALA, V. & PONS, X. 1995. Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 61: 935-944.
- PAVÓN, D.; VENTURA, M.; RIBAS, A.; SERRA, P.; SAURÍ, D. & BRETON, F. 2002. Land use change and socio-environmental conflict in the Alt Empordà county (Catalonia, Spain). *J. Arid Environment*, 54: 543-552.
- PERDIGAO, V. & ANNONI, A. 1997. *Technical and methodological guide for updating CORINE Land Cover data base*. Joint Research Centre. Italy.
- PERDIGAO, V.; VOSSEN, P. & GALLEGÓ, J. 1997. The Mars project: the European approach adaptable to national needs. Proceedings of the Workshop on New Tools for Agriculture and Forestry Statistics. Oporto, octubre 1995. European Commission, 63-78.
- PINO, J.; RIBAS, J.; PONS, X. & RODÀ, F. 1998. Análisis mediante SIG de la relación entre estructura del paisaje y riqueza de especies de aves en un área perimetropolitana de Barcelona. In: *Tecnología geográfica para el siglo XXI, VIII Coloquio del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Asociación de Geógrafos Españoles, 221-230.

- PLADEVALL, A. 1985. *Pròleg a Articles sobre el Principat de Catalunya, Andorra i zona de parla catalana del Regne d'Aragó al «Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar»*. Edició facsímil. Curial. Barcelona.
- PONS, X. 2000. MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing software. Centre de Recerca i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra.
- PONS, X. 1996. Els sistemes d'informació geogràfica: la nova carta. *Butll. Inst. Catalana Hist. Nat.*, 64: 37-52.
- PONS, X. & SOLÉ-SUGRANES, L. 1994. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 48: 191-204.
- PRO, J. 1987. Materiales para el estudio de la cuestión catastral en España: el siglo XIX. *Agric. Soc.*, 44: 325-377.
- PRO, J. 1988. Materiales para el estudio de la cuestión catastral en España: el siglo XX. *Agric. Soc.*, 46: 323-382.
- PUJOL, P. & PUJADAS, M. 1996. Usos del sòl i frontera agrària al sud-est de Nicaragua. *Doc. Anàl. Geogr.*, 28: 79-98.
- ROBINSON, A. H.; SALE, R. D.; MORRISON, J. L. & MUEHRCKE, P. 1987. *Elementos de Cartografía*. Omega. Barcelona.
- SALVADOR, R.; PONS, X.; VALERIANO, J. & DÍAZ-DELGADO, R. 2000. A semi-automatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series. *Int. J. Remote Sens.*, 21: 655-671.
- SERRA, P.; PONS, X. & SAURÍ, D. 2003. Post-classification change detection with data from different sensors. Some accuracy considerations. *Int. J. Remote Sens.*, 24: 3311-3340.
- SERRA, P. 2002. *Dinàmiques del paisatge agrari a l'Alt Empordà (1977-1997). Una anàlisi a partir de la teledetecció i dels sistemes d'informació geogràfica*. Departament de Geografia. Universitat Autònoma de Barcelona. [Tesi doctoral inèdita consultable a: <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-1004102-122545/>]
- SINGH, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sens.*, 10: 989-1003.
- SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKI, W. H.; SALAS, W. A. & NOBREA, D. 1994. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. *BioScience*, 44: 5, 315-322.
- STUTTARD, M. 1992. GIS and remote sensing. In: *Geographic information 1992-93* (Cadoux-Hudson, J.; Heywood, I. Ed.). Taylor & Francis. London. p. 173-182.
- TURNER II, B. 1994. Local faces, global flows: the role of land use and land cover in global environmental change. *Land Degrad. Rehabil.*, 5: 71-78.
- TURNER II, B. L.; SKOLE, D.; SANDERSON, S.; FISCHER, G.; FRESCO, L. & LEEMANS, R. 1999. Land use and land cover change. In: *Science/Research Plan. International Geosphere-Biosphere Programme report, 35 i International Human Dimensions Programme, 7*. IGBP Secretariat. Sweden.
- VELDKAMP, A. & FRESCO, L. 1996. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecol. Model.*, 85: 253-270.
- VIÑAS, O. & BAULIES, X. 1995. 1:250 000 land use of Catalonia (32 000 km²) using multitemporal Landsat-TM data. *Int. J. Remote Sens.*, 16: 129-145.
- WHITBY, M. & OLLERENSHAW, J. (Ed.). 1988. *Land use and the European environment*. Belhaven Press. London.
- YOUNG, A. 1970. *Viatge a Catalunya (1787)*. Ariel. Barcelona.
- ZAMORA, F. 1973. *Diario de los viajes hechos en Cataluña (1785-1790)*. Curial. Barcelona.