

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CONTROL DE LAS EXTRACCIONES MEDIANTE TELEDETECCIÓN

Vicente FABREGAT VENTURA*

(*) Hidrogeólogo. ITGE. Rfos Rosas, 23. 28003 MADRID

RESUMEN

Las imágenes registradas por sistemas de teledetección proporcionan un gran potencial para evaluar superficies de regadío. A pesar de ciertas limitaciones, esta técnica se ha afianzado como una herramienta válida para el control de las extracciones de agua subterránea con fines agrícolas.

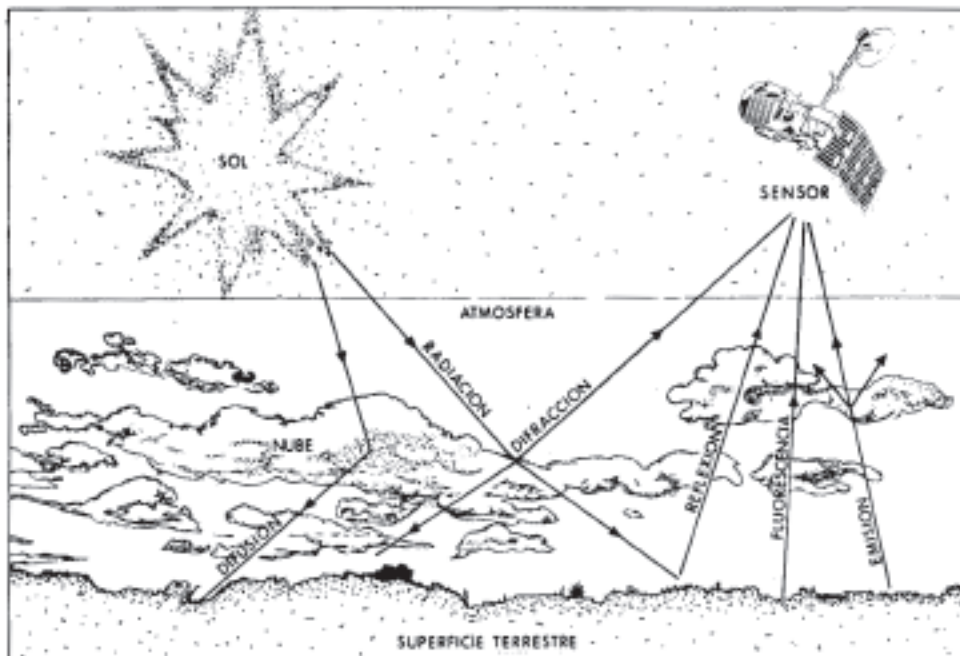
Se describen las características de los sistemas de teledetección más utilizados en recursos naturales, así como los procesos de tratamiento e interpretación que se realizan con las imágenes para estas aplicaciones. Se citan una serie de estudios aplicados a la cartografía temática y de usos del suelo, discriminación de tipos de cultivo y evaluación de superficies de regadío, actividades relacionadas con la estimación de la explotación del agua subterránea cuando los riegos son de esta procedencia.

BASES FÍSICAS DE LA TELEDETECCIÓN

La teledetección se define como la capacidad de observación a distancia. Se basa en el registro de la radiación electromagnética emitida, reflejada o difractada por la superficie terrestre. Generalmente se utilizan sensores embarcados en plataformas espaciales o aeroportados. Las técnicas de teledetección se han desarrollado en los últimos años de una manera espectacular y tienen aplicación en casi todas las áreas de las ciencias de la tierra.

Los sistemas de teledetección se clasifican en activos y pasivos; los primeros se basan en el registro de la energía reflejada a partir de una fuente de energía propia, como es el caso del radar. Los sistemas pasivos utilizan energías naturales como son la del sol o la propia energía emitida por las superficies a observar.

La teledetección se sustenta en los principios físicos de emisión-retrodispersión en los sistemas



activos, y de reflexión o emisión en los sistemas pasivos (figura 1).

Figura 1. Interacción de la energía electromagnética.

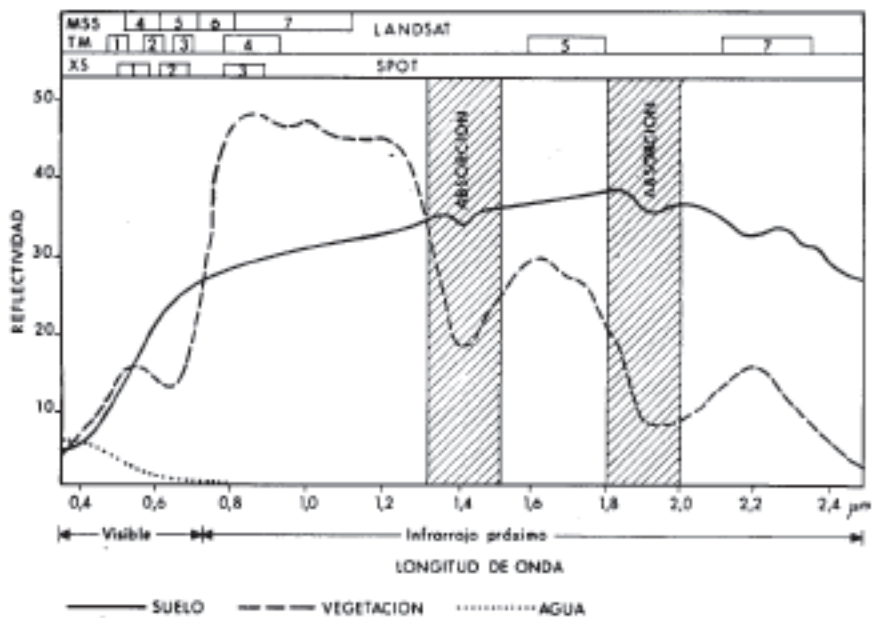


Figura 2. Curvas de reflectividad y bandas de los principales sensores.

La respuesta espectral de los objetos de la superficie terrestre: suelos, rocas, agua y vegetación, es distinta según la región del espectro electromagnético considerada, pudiendo presentar rasgos que permiten establecer firmas espectrales propias de cada material, a partir de las que es posible su identificación mediante la información registrada por teledetección. En la *figura 2* se representan las curvas espectrales de los tres componentes más importantes en los cultivos de regadío: suelo, vegetación y agua, en las regiones del visible y del infrarrojo próximo, con indicación de las bandas en que operan los satélites Landsat y Spot.

SISTEMAS DE TELEDETECCIÓN

Los más utilizados en la estimación y control de las extracciones de agua subterránea mediante teledetección son los sistemas diseñados para los satélites Landsat y Spot, y en menor medida el sistema AVHRR del satélite NOAA.

Las ventajas de la utilización de estos sistemas se basan en:

- Visualización sinóptica de grandes áreas.
- Posibilidad de observación de zonas de difícil acceso.
- Multitemporalidad de las observaciones.
- Homogeneidad respecto al sistema de observación.
- Registro de la información en diferentes bandas del espectro electromagnético.
- Registro digital de la información.
- Costes muy competitivos con otras técnicas.

Los sistemas de teledetección más utilizados en la estimación de los consumos de agua subterránea para regadío permiten:

- Cartografiar la cobertura vegetal del suelo.
- Estimar las condiciones de humedad.
- Cartografiar usos del suelo.
- Inventariar cultivos.
- Evaluar efectos de la sequía.
- Estimar el rendimiento de cultivos.

SATÉLITES DE RECURSOS NATURALES

Programa Landsat

El primer satélite de recursos naturales se lanzó en julio de 1972, con él comenzó el programa Landsat, que ha venido operando hasta el actual Landsat-5, habiéndose producido la pérdida del Landsat-6. Estos satélites han proporcionado la serie más completa y continua de información de la superficie terrestre desde la fecha de su primer lanzamiento. Una de sus ventajas es que

registran imágenes de forma sistemática.

SATÉLITE	SENSORES		PERÍODO OPERATIVO		
Landsat-1	RBV*	MSS		23.07.72	06.01.78
Landsat-2	RBV*	MSS		22.01.75	27.07.83
Landsat-3	RBV ^P	MSS ^T		05.03.78	05.09.83
Landsat-4		MSS	TM	16.07.82	- 06.96
Landsat-5		MSS	TM	01.03.84	-

RBV* Multiespectral 3 bandas (Return Bean Vidicon)
 RBV^P Pancromático
 MSS Multiespectral 4 bandas (Multiespectral Scanner Sensor)
 MSS^T Multiespectral 5 bandas, con banda térmica
 TM Multiespectral 7 bandas (Thematic Mapper)

Tabla 1. Programa Landsat.

Las características orbitales de estos satélites se resumen en la *tabla 2*.

	Landsat 1, 2 y 3	Landsat 4 y 5
Órbita		Polar heliosíncrona
Altitud	920 km	706 km
Inclinación	99,1°	98,2°
Ciclo orbital	18 días	16 días

Tabla 2. Características orbitales de los satélites Landsat.

La segunda generación de satélites, Landsat 4 y 5, está provista de dos sensores: el MSS y el TM. El MSS se incluyó para dar continuidad a los datos registrados por los satélites anteriores; es por tanto el sistema que ha proporcionado la serie temporal de imágenes más larga, desde 1972 hasta la actualidad. El TM está especialmente diseñado para aplicaciones de cartografía temática (*tabla 3*).

El sensor MSS es un equipo de barrido ópticoelectrónico que cubre una franja de terreno de 185 km de anchura. Dispone de 24 detectores que registran la radiación procedente del suelo en base a elementos mínimos de resolución (tamaño de pixel de 79 x 79 m).

El sensor TM es un equipo de barrido multiespectral que, mediante 100 detectores, proporciona una resolución espacial de 30 m para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 utilizando 16 detectores por banda, y de 120 m en la banda térmica (banda 6) que utiliza 4 detectores.

Las escenas Landsat abarcan una superficie de 185 x 185 km tomadas verticalmente.

BANDAS	RANGO ESPECTRAL (m)	APLICACIONES
MSS		
4	0,50- 0,60 (verde)	Estado fenológico de la vegetación.
5	0,60- 0,70 (rojo)	Discriminación de tipos de cultivos.
6	0,70- 0,80 (infrarrojo cercano)	Delimitación de masas de agua y contenido en biomasa.
7	0,80- 1,10 (infrarrojo cercano)	Delimitación de masas de agua y contenido en biomasa.
8	10,40-12,60 (infrarrojo térmico)	Medida de la humedad del suelo, estrés hídrico de la vegetación, zonas quemadas.
TM		
1	0,45- 0,52 (azul-verde)	Cartografía de aguas litorales, y discriminación entre suelo y vegetación.
2	0,52- 0,60 (verde)	Estado fenológico de la vegetación.
3	0,63- 0,69 (rojo)	Discriminación de tipos de cultivos.
4	0,76- 0,90 (infrarrojo cercano)	Delimitación de masas de agua y contenido en biomasa.
5	1,55- 1,75 (infrarrojo lejano)	Medida de la humedad del suelo y vegetación.
7	2,08- 2,35 (infrarrojo lejano)	Rocas alteradas y suelos.
6	10,40-12,5 (infrarrojo térmico)	Medida de la humedad del suelo, estrés

Tabla 3. Rango espectral y principales aplicaciones de las imágenes Landsat.

Programa Spot

El primer satélite Spot se lanzó en febrero de 1986, en una órbita polar circular inclinada 8°, a una altura media de 830 km. Se trata de una órbita heliosíncrona que permite unas condiciones de iluminación similares en cada escena, para una misma latitud y en una época del año determinada (SPOT IMAGE. 1989).

El satélite está equipado con dos instrumentos de captación denominados HRV 1 y HRV 2 (Haute Résolution Visible) que pueden funcionar de forma totalmente independiente, tomando imágenes verticales sobre la superficie terrestre y oblicuas de hasta 27° este-oeste. Esta capacidad de toma de imágenes oblicuas, posibilita la obtención de pares estereoscópicos y la repetición de imágenes con mayor frecuencia dentro de un ciclo orbital de 26 días, 4 días en la zona ecuatorial.

Aunque no registra todas las escenas de forma sistemática y éstas han de elegirse en base a un catálogo, existe una gran flexibilidad en cuanto a la frecuencia de toma de imágenes, dada la capacidad que tiene el satélite de programación.

Las escenas Spot abarcan una superficie de 60 x 60 km en las escenas tomadas en vertical,

y pueden llegar a los 80 km en dirección este-oeste en visión oblicua de 27°, con escenas de 60x80 km.

La resolución espacial de cada pixel es de 20x20 m o de 10x10 m dependiendo del modo multibanda o pancromático respectivamente, que puede ser de 20x27 m o de 10x13,5 m en visión oblicua extrema.

Este satélite tiene dos modos de registro distintos: el modo pancromático (P) y el modo multibanda (XS); ambos funcionan indistintamente en cada uno de los instrumentos, y de manera simultánea o individual. El modo pancromático realiza la observación en una banda espectral única, correspondiente a la parte del visible del espectro electromagnético sin el azul, y el modo multibanda registra en tres bandas del visible e infrarrojo cercano (*Tabla 4*).

BANDAS	RANGO ESPECTRAL (m)	APLICACIONES
P	0,51- 0,73	Aumentar la resolución combinada con otras imágenes.
XS1	0,50- 0,59 (verde)	Estado fenológico de la vegetación.
XS2	0,61- 0,68 (rojo)	Discriminación de tipos de cultivo.
XS3	0,79- 0,89 (infrarrojo cercano)	Delimitación de masas de agua y contenido en biomasa.

Tabla 4. Rango espectral y principales aplicaciones de Spot.

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE IMÁGENES

La teledetección presenta una serie de limitaciones, por lo que en cualquier aplicación deben fijarse unos objetivos acordes a su capacidad; este planteamiento es fundamental a la hora de acometer cualquier trabajo, evitándose así que esta herramienta sea considerada más vistosa que útil (CHUVIECO 1990). Cuando el objetivo es evaluar las extracciones de agua subterránea, hay que preguntarse si la utilización de esta técnica puede aportar ventajas, y tener en cuenta que su sola aplicación no será suficiente.

En los últimos años se han realizado numerosos trabajos que confirman la validez de esta técnica para la cartografía de cultivos; algunos trabajos de investigación han permitido incluso determinar las condiciones de humedad del suelo y la vegetación. La teledetección se debe considerar como un método indirecto de estimación de las extracciones de agua subterránea, en base a la cartografía de cultivos de regadío.

Escala y resolución de las imágenes

Teniendo en cuenta que para este tipo de aplicación la información más utilizada es la de los satélites Landsat y Spot, hay que considerar las limitaciones que plantean; las escalas límite comúnmente aceptadas para estas imágenes serían: para el sensor MSS 1:200 000, para el TM 1:50 000 y para el modo pancromático de Spot 1:20 000; los tamaños de pixel en imágenes representadas a estas escalas, para cada uno de los sensores, serían de 0,4 mm, (resolución de 80 m), 0,6 mm (resolución de 30 m) y 0,5 mm (resolución de 10 m), respectivamente.

La resolución condiciona las categorías que pueden discriminarse en una imagen; a mayor resolución mejor será el grado de detección de las distintas categorías, así como de su relación y distribución espacial. Este factor es crítico al plantear un trabajo, pues es evidente que la cartografía de cultivos es mucho más compleja en una zona de minifundios que en una zona donde exista una concentración parcelaria, en la que el tamaño mínimo de parcela de cultivo aumenta notablemente y su distribución es más regular.

En cualquier estudio, en función de la resolución espacial del sensor, se debe considerar cuál va a ser la unidad mínima a identificar, las categorías a discriminar y si esta unidad mínima es acorde con la realidad que presenta la zona de estudio.

Tipo de imágenes

La elección de las imágenes, generalmente Landsat o Spot, está condicionada por la escala del trabajo, la resolución espacial y la capacidad de discriminación espectral, entendiéndose que para la identificación de tipos de cultivo los modos multibanda de ambos sistemas pueden ser igualmente válidos.

Otro factor que influye en la elección del tipo de imagen es la extensión de la zona de estudio, que se traduce en un criterio económico según la relación coste-superficie. En general, las imágenes Landsat son más adecuadas cuando se trata de estudiar grandes superficies, mientras que las Spot se elegirán cuando se requiere un mayor detalle.

La utilización conjunta de imágenes Landsat TM, que proporcionan mejor resolución espectral (7 bandas), y el modo pancromático de Spot, con mayor resolución espacial (10 m), mejora notablemente los resultados (GANDÍA, S. y MELIÁ, J., Coord. 1991).

Los precios de los productos standard de Landsat son, para la escena completa, de 37 584 PTA para el sensor MSS y de 788 800 PTA para el TM. Estas escenas cubren una superficie de 185x185 km. Existe la posibilidad de adquirir cuartos de escena (92,5x85 km), o mini escenas (45x45 km), que cuestan 397 880 PTA y 309 720 PTA respectivamente. El coste por unidad de superficie es 23 PTA/km² (escena TM completa), 51 PTA/km² (cuarto de escena) o 153 PTA/km² (miniescena). La adquisición de una serie de imágenes temporales de una misma escena ofrece ventajas económicas.

Los precios de las escenas Spot son 498 800 PTA para el modo pancromático y 382 800 PTA para el modo multibanda; teniendo en cuenta que una escena Spot cubre 4 800 km² (60x80 km) el

coste por km² es de 104 PTA (pancromático) y 80 PTA (multibanda).

Fechas de registro de las imágenes

La fecha de registro de las imágenes es un factor muy a tener en cuenta. La elección de las fechas dependerá del objetivo del estudio; así en el caso de las superficies de regadío se necesitará conocer previamente el calendario de cultivos.

En el caso de los cultivos permanentes, las fechas más adecuadas para conseguir una mejor discriminación son aquellas en las que existe un mayor contraste entre estos cultivos y otro tipo de vegetación presente en la escena, generalmente en verano y después de un período seco, sin que se hayan producido precipitaciones en los días anteriores a la fecha de registro (FABREGAT, V. et al. 1992). Hay también que considerar el estado de crecimiento del cultivo, que condiciona el porcentaje de cobertura vegetal y de suelo expuesto.

Para los cultivos no permanentes, debe tenerse en cuenta si se trata de cultivos de primavera o de verano. En la mayor parte de zonas con este tipo de cultivos coexisten los dos tipos, lo que obliga a seleccionar un mínimo de dos imágenes de fechas diferentes. En algunos casos la similitud en los calendarios fenológicos dificulta la discriminación de cultivos (ESCUADERO, R. y PÉREZ, P. 1997). En cultivos como el del arroz, debido a las variaciones fenológicas que se registran en las superficies cultivadas y la coincidencia de su ciclo con otros cultivos, la elección de las fechas de registro es especialmente importante (PRADOS, M^a. J. 1995).

INTERPRETACIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Se pueden considerar dos maneras de abordar la interpretación de las imágenes. La primera es la que se realiza por fotointerpretación de productos ya elaborados, mientras que el tratamiento digital se realiza a partir de la adquisición de imágenes en soporte digital, a las que se realiza un tratamiento acorde con los objetivos planteados. Ambos tipos de tratamiento tienen ventajas e inconvenientes (CHUVIECO 1990); su elección depende de factores económicos, humanos, tipo de trabajo, puntual o multitemporal, precisión necesaria, homogeneidad y extensión de la zona de estudio.

El tratamiento visual se realiza de forma similar a la fotointerpretación tradicional, pero a partir de imágenes de satélite sobre las que se han realizado ciertos tratamientos, como corrección geométrica, combinaciones de bandas en falso color en soporte papel, negativos o reproducibles, a las que se puede haber añadido otro tipo de información como es el caso de los ortofotomapas del Instituto Geográfico Nacional.

El tratamiento digital se realiza a partir de la información registrada por el satélite, que se organiza como una matriz numérica compuesta por celdas (pixels) a las que se les asigna un valor numérico relacionado con la energía medida por el sensor. En el caso de las imágenes multispectrales cada valor digital corresponde a un rango de longitud de onda. Estos valores se codifican de 0 a 255 para cada pixel.

El procesado digital de las imágenes comprende operaciones de corrección, procesos de realce de la imagen, transformaciones de la imagen y técnicas de clasificación.

Correcciones radiométricas y geométricas (preprocesado)

Las correcciones radiométricas, tienen por objeto eliminar y compensar errores radiométricos, distorsiones y ruido producidos por deficiencias del sensor. En parte estas correcciones se realizan en los centros de distribución de datos.

Las correcciones geométricas se realizan para eliminar las distorsiones presentes en las imágenes y transformarlas a un sistema de proyección cartográfico. De esta forma es posible la superposición de imágenes y la integración de la imagen con otro tipo de información cartográfica mediante la utilización de un S.I.G.

Realce y mejora de la imagen

Los procesos de realce se dirigen a mejorar la calidad visual de la imagen. Se realizan para resaltar, mejorando el contraste de la imagen. Pueden modificar el valor del pixel (realce radiométrico) o afectar a su distribución espacial, en función de los que le rodean (realce geométrico).

Se utilizan filtros para acentuar o suavizar determinadas frecuencias espaciales en las imágenes. Así puede minimizarse el ruido o resaltar ciertos rasgos de la imagen.

Transformaciones de la imagen

Se utilizan para crear bandas adicionales a las originales, que permitan discriminar mejor algunos aspectos. Se realizan para facilitar la clasificación y son muy utilizadas en aplicaciones relacionadas con la vegetación. Consisten en la aplicación de diferentes operaciones a las bandas originales; las más utilizadas son: cocientes entre bandas, índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), CP (componentes principales) y TTC (Tasseled Cap)

De los cocientes entre bandas, el efectuado entre la banda infrarroja y roja se utiliza para la cartografía, seguimiento y control de la vegetación. Para el sensor Landsat MSS (MSS7/MSS5), para el TM (TM4/TM3) y en el caso de Spot (SX3/SX2). El cociente TM5/TM4 puede utilizarse para separar vegetación y suelos desnudos.

El NDVI es muy utilizado en estudios de cambios en la vegetación a escala continental, pero se cuestiona su validez en estudios de detalle. Para éstos también se ha propuesto una corrección que define el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (GILABERT, M.A. et al. 1997).

El CP es ampliamente utilizado en estudios multitemporales (VIÑAS et al. 1989). Permite eliminar información redundante y facilitar la identificación de los elementos superficiales.

La transformación TTC fue definida para su aplicación en predicción de cosechas, relacionando las variaciones de la vegetación registradas en las bandas rojo e infrarrojo con los tipos de suelo.

Clasificación digital de las imágenes

Es un proceso por el que cada pixel de la imagen se asigna a un grupo determinado o categoría definida. Existen dos sistemas de clasificación complementarios entre sí, automático y supervisado.

La clasificación automática consiste en el agrupamiento de los pixels de una imagen en categorías, sin que el operador intervenga en el proceso, extrayéndose de la imagen clases espectrales sin tener una categoría previa asignada. Estas clasificaciones suelen servir como paso previo a la clasificación supervisada y permiten identificar si las categorías que se pretende discriminar pueden agruparse, o si en una determinada categoría se agrupan varias que podrían separarse.

Para la realización de una clasificación supervisada se deben definir primero las categorías en que se quiere transformar la imagen en función de lo que se quiere extraer de la misma. En primer lugar se seleccionan las parcelas de control para cada categoría, con el fin de establecer su signature espectral. A continuación se realiza la clasificación propiamente dicha mediante la asignación de todos los pixels de la imagen a las categorías definidas. Por último se realiza la evaluación de los resultados obtenidos.

La representación gráfica de la signature espectral de cada categoría para cada una de las bandas, definida en base a una o varias parcelas de control, indica de manera estadística qué bandas son las más adecuadas para realizar mejor la clasificación. Hay que tener en cuenta que en este tipo de gráficos estamos considerando valores medios. Para mayor precisión debe de tenerse en cuenta la dispersión de los valores digitales de cada clase, que puede visualizarse mediante un gráfico de confusión espectral (CABANILLAS, E. et al. 1991).

Para la realización de las clasificaciones supervisadas se utilizan diferentes algoritmos. Los más utilizados son: paralelepípedo, mínima distancia y máxima probabilidad. En su aplicación para la evaluación de superficies de cultivo la clasificación mediante máxima probabilidad da generalmente mejores resultados para el conjunto de categorías representadas en una imagen. Sin embargo, para discriminar tipos de cultivo individuales el procedimiento de mínimas distancias puede resultar más adecuado. Por ello no debe de descartarse a priori ninguno de los métodos de clasificación, y es conveniente realizar pruebas de clasificación en las que se determine el clasificador más adecuado en función de que el estudio vaya dirigido al conjunto de categorías o a una particular (LOBATO, A. y MOREIRA, J.M.; 1991).

En zonas donde la estructura y utilización del territorio, así como los tipos de cultivo, no presentan grandes modificaciones de un año para otro, la utilización de imágenes clasificadas del año anterior y la realización de la encuesta junto con la utilización de un estimador de regresión, puede obtener resultados similares a los que se obtendrían de clasificar una nueva imagen, coetánea con la realización de la encuesta; ello supone un importante ahorro económico,

en cuanto a la adquisición y tratamiento de imágenes todos los años (GONZÁLEZ, F. et al. 1997).

Validación de los resultados obtenidos

Es de suma importancia para aceptar como bueno el trabajo realizado. Aparte de la verificación cualitativa que, a priori y de manera refleja, se realiza al visualizar una clasificación, existen métodos estadísticos para evaluar cuantitativamente la fiabilidad de la clasificación obtenida.

La comprobación de los resultados obtenidos en una clasificación puede realizarse de varias maneras. Cuando existe información disponible, comparando con los resultados de estudios anteriores (estadísticas agrarias, cartografía de detalle etc.), previamente aceptados como válidos y verificando la clasificación de las categorías en una serie de parcelas de control seleccionadas (FABREGAT, V. et al. 1992).

La verificación mediante la utilización de áreas test permite una comprobación más independiente, consistente en definir previamente una serie de parcelas de muestreo que sirvan para la comprobación de la clasificación, representadas en la imagen por un mosaico de pixels que caracterizan la signatura espectral de cada categoría incluida en estas parcelas test.

La obtención y presentación de resultados son el objetivo final de todo el proceso de tratamiento digital de imágenes. En las aplicaciones de teledetección dirigidas a evaluación de las explotaciones de agua subterránea para riego, el resultado que se persigue es un mapa de superficies de regadío con especificación del tipo de cultivo. Igualmente se considera útil la representación de aquellos elementos relacionados con el regadío, muchos de ellos disponibles en cartografías existentes e inventarios de puntos de agua, que a su vez llevan asociados otro tipo de información.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son capaces de integrar la información obtenida del tratamiento digital de las imágenes además de ser adecuados para tratar un gran volumen de información cartográfica. Su función es la de mejorar el almacenamiento, gestión, visualización y producción de mapas con comodidad y eficacia (CEDEX, 1994).

ESTUDIOS APLICADOS

La utilización de la teledetección en trabajos relacionados con la evaluación de extracciones de agua subterránea es amplia, siendo numerosos los estudios realizados en España en los últimos años. Se describen algunos de estos trabajos en campos como la cartografía temática, usos del suelo, cultivos de regadío y recursos hídricos.

La mayor parte de imágenes utilizadas en este tipo de estudios son Landsat y Spot. También se han utilizado imágenes AVHRR en aplicaciones de estimación y evaluación de la cobertura vegetal mediante índices de vegetación (LAMMINI, A. et al. 1997), en estimación de rendimientos de cosechas (DELGADO, J.A. et al. 1997) y en la estimación de la evapotranspiración mediante utilización conjunta con imágenes Landsat TM (ARTIGAO, M. et al. 1997). En menor medida la utilización de manera experimental de imágenes radar (ERS-1 y 2) complementariamente con

imágenes Landsat TM (LOBO, A. et al. 1995).

Cartografía y usos del suelo

En la cartografía temática a escala 1:250 000 mediante imágenes multitemporales Landsat TM, los cultivos de regadío se incluyen como categorías diferenciadas (herbáceos de regadío y frutales de regadío) (VIÑAS et al. 1989).

En trabajos de cartografía medioambiental a escala 1:100 000, a partir del tratamiento de imágenes Landsat TM, las superficies de regadío se obtienen mediante clasificación, utilizando índices de vegetación y máscaras que evitan clasificar como regadío otro tipo de vegetación (MORENO, V. y BARCO, R. 1997).

En trabajos de usos del suelo y estadísticas agrarias, los cultivos de regadío son una de las categorías discriminadas (ESCUADERO, R. y MARTÍNEZ, S. E. 1989). En proyectos de usos del suelo a nivel de la Comunidad Europea (CORINE-Land Cover) la precisión en la identificación de diferentes cultivos de regadío es variable, pero siempre superior al 84% (BAULIES, X. et al. 1991); en la aplicación de este proyecto a las Islas Canarias se reconocen insuficiencias e indeterminaciones de clases y la necesidad de mucho apoyo verdad-terreno para las superficies agrícolas (ARDIZONE, J.A. et al. 1991).

En la realización de inventarios de cultivos se estiman también los rendimientos de los mismos (COPE, R. et al. 1989). La utilización de una metodología que combina las técnicas de teledetección con trabajos de campo es la manera más adecuada para la evaluación de las superficies de cultivo y realización de estadísticas agrarias (LOBATO, A. y MOREIRA, J.M. 1991).

En diversas áreas de Castilla - La Mancha, se han utilizado imágenes Landsat TM para la identificación de viñedos (SEGARRA, D. et al. 1997) y de cultivos de secano (CALERA, A. 1997), a pesar de las dificultades que este tipo de cultivos plantea por su bajo grado de cobertera.

Las técnicas de fotointerpretación visual, tratamiento digital y análisis multitemporal de imágenes Landsat TM, permite el estudio de la evolución de los usos del suelo y las modificaciones de la estructura agraria a lo largo del tiempo. En zonas de especial interés, como el Sistema Acuífero 23, en el que se ubica el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, la utilización de estas técnicas facilita el estudio del impacto producido por el incremento de las explotaciones de agua subterránea, que inciden directamente en la desaparición de lagunas y humedales de interés ecológico (LABRANDERO et al. 1997).

Los pares estereoscópicos y la mayor resolución espacial que ofrece el modo pancromático del satélite Spot, pueden ser de utilidad en estudios de aptitud de tierras dentro de proyectos de planificación (SÁNCHEZ, J.I. y PÉREZ de los COBOS, P. 1991).

Se han realizado estudios con radiómetros de campo en las mismas longitudes de onda que registran los sensores de Landsat y Spot, dirigidos a evaluar mediante técnicas de teledetección el

estrés hídrico y la fertilización en cultivos (SALVANS, V. 1989).

Cultivos de regadío y recursos hídricos

Es evidente que con las técnicas de teledetección se puede abordar la estimación de superficies de regadío, y en muchos casos la identificación de algunos tipos de cultivo, pero el origen del agua se debe asignar integrando otro tipo de información, delimitando las zonas y parcelas regadas con agua subterránea o superficial (CABANILLAS, E. et al. 1991).

Entre las ventajas que supone la aplicación de la teledetección a la estimación de superficies de regadío existe coincidencia en su objetividad y rapidez, especialmente en zonas extensas. El coste es otra ventaja adicional; en trabajos realizados en la cuenca alta del Guadiana se ha estimado entre 1 y 10 PTA/ha (GARCÍA, M^a. A. et al. 1992), y en un estudio multitemporal a lo largo de tres años en la cuenca del Segura, con una superficie de 2 000 000 de hectáreas, en 2 PTA/ha (QUINTANILLA, A. et al. 1997).

La integración de la información extraída del tratamiento de imágenes con datos de otras procedencias, como encuestas del M.A.P.A., mapas del uso del suelo, etc., contribuye a mejorar los resultados de las estimaciones y la discriminación de cultivos cuando existe similitud en sus calendarios fenológicos (ESCUADERO, R. y PÉREZ, P. 1997).

Otra ventaja de la teledetección es "volver atrás", es decir, poder realizar un estudio de la evolución en años anteriores (regadíos anteriores a la promulgación de la ley de aguas, evolución de regadíos durante un período de sequía o de mayor demanda) (QUINTANILLA, A. et al. 1997). Si la utilización del sensor MSS de Landsat es adecuado para estos objetivos se puede retroceder hasta 1972, cuando en muchas zonas los riegos con agua subterránea no estaban extendidos.

En la cuenca del Guadiana se han desarrollado de manera periódica proyectos de seguimiento de la evolución de las superficies de regadío mediante teledetección desde el año 1990.

En la actualidad existen diversos proyectos dirigidos a una mejor gestión de los recursos hídricos utilizando técnicas de teledetección y SIG, en los que se plantean como objetivos el cálculo y representación cartográfica de la evapotranspiración, el seguimiento de superficies de regadío, el cumplimiento de los regímenes de explotación en acuíferos sobreexplotados, la evolución hídrica de humedales, etc. (MONTESINOS, S. et al. 1997).

CONSIDERACIONES FINALES

La aplicación de la teledetección como técnica auxiliar para el control y evaluación de las explotaciones de agua subterránea ofrece un enorme potencial por su capacidad para abordar superficies extensas. Es además una técnica objetiva y fiable que permite la cartografía y evaluación de superficies de regadío e incluso en algunos casos la discriminación de tipos de cultivo, siendo de gran utilidad para la estimación y control de las explotaciones de agua subterránea.

Los sistemas Landsat y Spot son los más utilizados en estudios aplicados a la cartografía temática y usos del suelo, discriminación de tipos de cultivo y evaluación de superficies de regadío, actividades todas ellas relacionadas con la estimación de la explotación de agua subterránea.

La gestión mediante un sistema de información geográfica (SIG) de la información que se extrae del análisis de las imágenes supone una gran ayuda en la toma de datos, evaluación de superficies de regadío y obtención de información rápida y eficaz de grandes áreas, al tiempo que permite la actualización periódica de esta información.

En regadíos no tradicionales con grandes variaciones en las superficies regadas en cuanto a su distribución espacial y temporal, la aplicación de la teledetección se presenta como muy ventajosa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARDIZONE, J.A.; AROZARENA, A.; DELGADO, J.; HERRERO, M.; VILLA, G. y VIVAS, P. (1991). El Programa CORINE. Proyecto Land Cover. Una metodología aplicada a las Islas Canarias. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 234-237. A.E.T. Sevilla.
- ARTIGAO, M.; HURTADO, E.; CASELLES, V.; CASTERERAD, A. y MARTÍNEZ, A. (1997). Estimación de la evapotranspiración en el polígono de regadío de Flumen (Huesca). Teledetección usos y aplicaciones 3-10. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- BAULIES, X.; JOAQUINET, M.; PINEDA, L. y TARDA, A. (1991). El proyecto CORINE-Land Cover en el sector Oriental Peninsular y las Islas Baleares. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 244- 250. A.E.T. Sevilla.
- CABANILLAS, E.; IGUALADA, F.J.; CATURLA, C. y del BARRIO V. (1991). Levantamiento gráfico por teledetección de las superficies de regadío en las comarcas agrarias de Benavente y los Valles y Campos-Pan en la provincia de Zamora. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 238-243. A.E.T. Sevilla.
- CALERA, A.; SEGARRA, D. y MELIÁ, J. (1997). Respuesta espectral en los cultivos de secano en Castilla -La Mancha mediante imágenes Landsat TM. VII Congreso Nacional de Teledetección, 81-84. A.E.T. Santiago de Compostela.
- CEDEX (1990). Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en hidrología. Cedex, Escuela de formación técnica MOPT y Medio Ambiente.
- COPE, R.; DEANE, G. y del POTRO, R. (1989). Uso de imágenes de satélite para cálculo de un inventario de cultivos en las provincias de Valladolid y Zamora. III Reunión Científica del grupo de trabajo en Teledetección. 77-80 A.E.T. Madrid.
- CUEVAS, J.M. y GONZÁLEZ, F. (1991). Evolución de las superficies cultivadas en regadío en el entorno del Parque Nacional de Doñana. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 248-250 A.E.T. Sevilla.
- CHUVIECO, E.(1990). Fundamentos de teledetección espacial, Rialp, Madrid.

- DELGADO, J.A.; ILLERA, P.; GONZÁLEZ F. y TERRAB, R. (1997). Utilización de imágenes NOAA para la estimación de rendimientos de cosechas en Castilla y León. Teledetección usos y aplicaciones 31-38. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- ESCUADERO, R. y MARTÍNEZ, S.V.; (1989). Reconocimiento de la ocupación del suelo mediante teledetección en dos municipios vallisoletanos, Ataquines y Peñafiel. III Reunión Científica del grupo de trabajo en Teledetección. 23-32. A.E.T. Madrid.
- ESCUADERO, R. y PÉREZ, P. (1997). Discriminación y cuantificación de los usos del suelo y regadíos en la cuenca del Duero por teledetección. Teledetección usos y aplicaciones 11-18. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- FABREGAT, V.; GUMIEL, J.C. y ANTON-PACHECO, C. (1992). Aplicación de técnicas de teledetección para la estimación de las superficies de regadío (cítricos y cultivos bajo plástico) en el sector occidental del Sistema Acuífero 25. V Simposio de Hidrogeología, A.E.H.S. 577-590 Alicante
- GANDÍA, S. y MELIÁ, J., Coord. (1991). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura. Universitat de Valencia, Departament de Termodinàmica, Unitat de Investigació de Teledetecció.
- GARCÍA, M^a.A.; LÓPEZ-CAMACHO, B. y MONTESINOS, S. (1992). Aplicación de la teledetección al conocimiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana. V Simposio de Hidrogeología, A.E.H.S. 591-600 Alicante.
- GILABERT, M.A.; GONZÁLEZ-PIQUE, A.; FERNÁNDEZ-PALACIOS, A.; LOBATO, A. y MARRARA, J.M.; (1991). Cartografía y estadística de cultivos en riego en el entorno de Doñana mediante la integración de S.I.G. y clasificación de imágenes Landsat. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 276-286 A.E.T. Sevilla.
- GONZÁLEZ, F. y CUEVAS, J.M. (1993). Estadísticas agrarias y teledetección. Una nueva forma de aplicar el estimador de regresión. Revista de teledetección 14-16 A.E.T. febrero 1993 Madrid.
- GONZÁLEZ, F.; ARBIOL, R.; BAULIES, X. y CUEVAS, J.M. (1997). Utilización diacrónica de encuestas de campo e imágenes de satélite en la estimación de superficies cultivadas por método de regresión. Teledetección usos y aplicaciones 27-30. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- LABRANDERO, J.L.; VEGA, J.M. y ROMERO, R. (1997). Las transformaciones de la campiña manchega y su influencia en el deterioro del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. VII Congreso Nacional de Teledetección, 328-331. A.E.T. Santiago de Compostela.
- LAMMINI, A.; CASNOVA, J.L. y RODRÍGUEZ, M.P. (1997). Estudio de la evolución de diversas áreas mediante imágenes NOAA-AVRR. Teledetección usos y aplicaciones 53-57. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- LOBATO, A. y MOREIRA, J.M.; (1991). Análisis metodológicos y de resultados de diferentes alternativas de clasificación de imágenes de satélite para la obtención de estadísticas agrarias. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 287-293 A.E.T. Sevilla.
- LOBO, A.; CHIC, O.; CASTERAD, A. y SOLÉ, L. (1995). Estudio de la información aportada por las imágenes radar ERS-1.SAR.PRI a las TM para la identificación de cultivos. Revista de teledetección 33-37 A.E.T. junio 1995 Madrid.

- LÓPEZ, S.; SÁNCHEZ, J.I. y PÉREZ, P. (1997). Estadística de cultivos de regadío y detección de cambios en la Cuenca del Guadiana. VII Congreso Nacional de Teledetección, 66-69. A.E.T. Santiago de Compostela.
- MONTESINOS, S. et al. (1997). Aplicación de técnicas de observación de la tierra a la gestión integral de los recursos hídricos de la Cuenca (ASTIMWR). VII Congreso Nacional de Teledetección, 361-363. A.E.T. Santiago de Compostela.
- MOREIRA, J.M.; RAMOS, A.; LOBATO, A. y FERNÁNDEZ-PALACIOS, A. (1989). Evaluación de superficies de cultivo de fresón mediante imágenes Landsat TM. Su uso en un sistema de predicción de cosecha. III Reunión Científica del grupo de trabajo en Teledetección. 93-103. A.E.T. Madrid.
- MORENO, V. y BARCO, R. (1997). Metodología para la generación de cartografía medioambiental. VII Congreso Nacional de Teledetección, 332-333. A.E.T. Santiago de Compostela.
- PRADOS, M^a. J. (1995). La utilización de imágenes Landsat-5 TM para la estimación y seguimiento de áreas de monocultivo arrocero y su vinculación a espacios naturales. Revista de teledetección 43-47. A.E.T. diciembre 1995 Madrid.
- QUINTANILLA, A.; CASTAÑO, S.; MONTESINOS, S.; GARCÍA-CONSUEGRA, J. y NAVARRO, E. (1997). Aproximación al estudio de la evolución temporal de la superficie en regadío de la cuenca del río Segura mediante técnicas de teledetección y S.I.G. Teledetección usos y aplicaciones 39-46. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- SALVANS, V.; FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E. y SOLÉ, L. (1989). Caracterización radiométrica de situaciones de stress en cultivos de trigo y alfalfa. III Reunión Científica del grupo de trabajo en Teledetección. 113-122. A.E.T. Madrid.
- SÁNCHEZ, J.I. y PÉREZ de los COBOS, P. (1991). Aplicaciones de la teledetección espacial a la planificación del uso agrario del agua. Métodos de trabajo. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. 311- 315. A.E.T. Sevilla.
- SEGARRA, D.; LANJERI, S.; BRAS, A.; MONTERO, F. y MELIÁ, J. (1997). El viñedo en Castilla - La Mancha y su seguimiento mediante imágenes Landsat-5 TM. VII Congreso Nacional de Teledetección, 70-73. A.E.T. Santiago de Compostela.
- SGOP (1990). Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de los recursos hidráulicos aplicados al regadío. Proceso digital de imágenes LANDSAT TM de la Mancha Occidental. Informaciones y estudios nº51, MOPU.
- SPOT IMAGE (1989). Catálogo de los productos SPOT y de los servicios. CNES France.
- VIÑAS, O.; BAULIES, X.; ROMEU, J. y VIÑAS, M. (1989). Mapa 1:250 000 de usos y cubiertas del suelo de Catalunya a partir de datos T.M. III Reunión Científica del grupo de trabajo en Teledetección. 43-50. A.E.T. Madrid.